



UNIVERZITET U SARAJEVU
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET
ODSJEK ZA AUTOMATIKU I ELEKTRONIKU

Robusno upravljanje laboratorijskim modelom helikoptera

ZAVRŠNI RAD
- PRVI CIKLUS STUDIJA -

Student:
Salko Vladavić

Mentor:
Red. prof. dr Jasmin Velagić

Sarajevo,
septembar 2023.

Sažetak

Glavni objekt istraživanja ovog rada je potencijal primjene robusnog regulatora baziranog na kliznim režimama radi upravljanja laboratorijskog modela helikoptera. Opisan je fizički model helikoptera CE150, te postupak kreiranja matematskog modela kasnije upotrijebljenog za potrebe sinteze regulatora u sklopu simulacije. Pored toga rad ukratko pojašnjava PID regulaciju, kao i adaptivno upravljanje sa promjenjivim pojačanjem, koje svoj rad bazira na radu PID regulatora. Detaljno će se prikazati sinteza robusnog SMC regulatora, zajedno sa karakterističnim pojmovima koji se tiču tematike. Spomenuti regulatori se porede u simulaciji, a kasnije i eksperimentalno. Povuci će se paralele između simulacionog odziva i eksperimentalnog odziva respektivnih regulatora u cilju izvođenja zaključka o opravdanosti upotrebe ponuđenog simulacionog modela. Na osnovu snimljenih odziva, rad se završava donošenjem zaključka o ispravnosti navedenih regulacija. Iznose se ideje o smjeru razvijanja upravljačkog sistema u nekim budućim istraživanjima.

Abstract

The main object of research in this paper is the potential application of a robust sliding mode controller for the purpose of controlling a laboratory model helicopter. The physical model of the CE150 helicopter is described, as well as the process of creating the mathematical model used later for controller synthesis in simulations. Additionally, the paper briefly explains PID control and adaptive control with variable gains, which uses PID controller as its base controller. A detailed presentation of the synthesis of a robust Sliding Mode Control (SMC) regulator will be provided, along with characteristic concepts relevant to the topic. These mentioned controllers are compared in simulations and later in experiments. Parallels are drawn between the simulation response and the experimental response of the respective controllers in order to draw conclusions about the validity of the proposed simulation model. Based on the recorded responses, the paper concludes on the correctness of the mentioned control strategies. Ideas for the direction of development of a control system in future research are also presented.

Postavka zadatka završnog rada I ciklusa:

U ovom radu je potrebno:

- opisati dinamiku nelinearnog laboratorijskog modela helikoptera CE150 i izvršiti modeliranje modela u programskom alatu MATLAB/Simulink,
- obaviti sintezu robusnog regulatora sa promjenljivim pojačanjem u različitim režimima leta, odnosno promjene uglova elevacije i azimuta,
- verifikirati efikasnost razvijenog robusnog regulatora kroz simulaciju i eksperimente.
- porediti različite načine regulacije (PID, SMC i adaptivno upravljanje), te izvesti zaključke o njihovoj primjenjivosti

Polazna literatura:

- [1] Nedim Osmić, Sinteza fuzzy viševarijablinog sistema upravljanja i stabilizacije laboratorijskog modela helikoptera, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Sarajevu, 2009
- [2] Decarlo, R. A., Zak, S. H., "A quick introduction to sliding mode control and its applications 1", 2008

Red. prof. dr Jasmin Velagić, dipl. ing. el.

Izjava o autentičnosti radova

Završni rad I ciklusa studija

Ime i prezime: Salko Vladavić

Naslov rada: Robusno upravljanje laboratorijskim modelom helikoptera

Vrsta rada: Završni rad Prvog ciklusa studija

Broj stranica:

Potvrđujem:

- da sam pročitao dokumente koji se odnose na plagijarizam, kako je to definirano Statutom Univerziteta u Sarajevu, Etičkim kodeksom Univerziteta u Sarajevu i pravilima studiranja koja se odnose na I i II ciklus studija, integrirani studijski program I i II ciklusa i III ciklus studija na Univerzitetu u Sarajevu, kao i uputama o plagijarizmu navedenim na web stranici Univerziteta u Sarajevu;
- da sam svjestan univerzitetskih disciplinskih pravila koja se tiču plagijarizma;
- da je rad koji predajem potpuno moj, samostalni rad, osim u dijelovima gdje je to naznačeno;
- da rad nije predat, u cjelini ili djelimično, za stjecanje zvanja na Univerzitetu u Sarajevu ili nekoj drugoj visokoškolskoj ustanovi;
- da sam jasno naznačio prisustvo citiranog ili parafraziranog materijala i da sam se referirao na sve izvore;
- da sam dosljedno naveo korištene i citirane izvore ili bibliografiju po nekom od preporučenih stilova citiranja, sa navođenjem potpune reference koja obuhvata potpuni bibliografski opis korištenog i citiranog izvora;
- da sam odgovarajuće naznačio svaku pomoć koju sam dobio pored pomoći mentora i akademskih tutora/ica.

Sarajevo, 20. 9. 2023.

Potpis:

Salko Vladavić

Sadržaj

| | |
|---|-------------|
| Popis slika | vii |
| Popis tabela | viii |
| 1 Uvod | 1 |
| 1.1 Opis problema | 1 |
| 1.2 Pregled područja istraživanja | 1 |
| 1.3 Motivacija | 2 |
| 1.4 Zadaci i ciljevi istraživanja | 2 |
| 1.5 Struktura rada | 2 |
| 2 Opis sistema upravljanja | 3 |
| 2.1 Uvod | 3 |
| 2.2 Pojašnjenje sistema | 4 |
| 2.3 Matematski model helikoptera | 6 |
| 3 Sistemi upravljanja | 11 |
| 3.1 Uvod | 11 |
| 3.2 Sistem | 11 |
| 3.3 Sistemi upravljanja | 11 |
| 3.4 PID regulator | 12 |
| 3.4.1 Uvod | 12 |
| 3.4.2 O regulatoru | 12 |
| 3.4.3 Implementacija PID regulatora | 13 |
| 3.5 Robusno upravljanje | 15 |
| 3.6 Upravljanje korištenjem kliznih režima | 15 |
| 4 Sinteza robusnog regulatora | 17 |
| 4.1 Uvod | 17 |
| 4.2 Klizni režim upravljanja prvog reda | 17 |
| 4.3 Klizni režim upravljanja prvog reda sa aproksimacijom signum funkcije | 19 |
| 4.4 "Super - Twisting" algoritam | 21 |
| 5 Provjera validnosti sistema upravljanja | 24 |
| 5.1 Simulacijski rezultati | 24 |
| 5.1.1 Uvod | 24 |
| 5.1.2 PID regulacija | 24 |
| 5.1.3 Adaptivni regulator | 25 |
| 5.1.4 Poređenje simulacijskih odziva | 27 |

| | | |
|-------|-------------------------------------|-----------|
| 5.2 | Eksperimentalni rezultati | 28 |
| 5.2.1 | Uvod | 28 |
| 5.2.2 | PID regulator | 30 |
| 5.2.3 | Adaptivno upravljanje | 32 |
| 5.2.4 | SMC regulator | 35 |
| | Literatura | 40 |
| | Indeks pojmova | 40 |

Popis slika

| | | |
|------|---|----|
| 2.1 | Fizički model sistema | 3 |
| 2.2 | Shematski prikaz modela helikoptera | 4 |
| 2.3 | Shema upravljanja modelom helikoptera | 5 |
| 2.4 | Univerzalna shema H - most spoja | 6 |
| 2.5 | Konačni model helikoptera u okruženju Simulink | 10 |
| 3.1 | Sistem otvorenog upravljanja u općem slučaju | 11 |
| 3.2 | Sistem zatvorenog upravljanja u općem slučaju | 12 |
| 3.3 | Blokovska struktura sistema automatskog upravljanja sa PID regulatorom | 13 |
| 3.4 | Struktura PID regulatora sa podešenim parametrima | 14 |
| 3.5 | Problem chattering - a | 16 |
| 4.1 | Simulink shema SMC regulatora prvog reda | 18 |
| 4.2 | Simulacijski rezultati upravljanja azimuta sa SMC regulatorom prvog reda | 18 |
| 4.3 | Simulacijski rezultati upravljanja elevacije sa SMC regulatorom prvog reda | 19 |
| 4.4 | Simulink shema SMC regulatora prvog reda sa aproksimiranom sgn funkcijom | 20 |
| 4.5 | Simulacijski rezultati upravljanja azimuta sa SMC regulatorom prvog reda sa aproksimiranom signum funkcijom | 20 |
| 4.6 | Simulacijski rezultati upravljanja elevacije sa SMC regulatorom prvog reda sa aproksimiranom signum funkcijom | 21 |
| 4.7 | Blok shema PI (lijevo) i Super - Twisting (desno) regulatora | 21 |
| 4.8 | Simulink model za "Super - Twisting" SMC regulator | 22 |
| 4.9 | Simulacijski odziv za elevacioni ugao ("Super - Twisting " SMC regulator) | 22 |
| 4.10 | Simulacijski odziv za azimutni ugao ("Super - Twisting " SMC regulator) | 23 |
| 5.1 | Simulacijski odziv za elevacioni ugao (PID) | 24 |
| 5.2 | Simulacijski odziv za azimutni ugao (PID) | 25 |
| 5.3 | Simulacijski odziv za elevacioni ugao (Adaptivni regulator) | 26 |
| 5.4 | Simulacijski odziv za azimutni ugao (Adaptivni regulator) | 26 |
| 5.5 | Poređenje simulacionog odziva svih regulatora za azimutni ugao | 27 |
| 5.6 | Poređenje simulacionog odziva svih regulatora za elevacijski ugao | 28 |
| 5.7 | Simulink shema upravljanja helikoptera | 29 |
| 5.8 | Simulink shema SMC regulatora realizovanog na stvarnom sistemu | 29 |
| 5.9 | Eksperimentalni odziv za elevacioni ugao (PID regulacija) | 30 |
| 5.10 | Eksperimentalni odziv za azimutni ugao (PID regulacija) | 31 |
| 5.11 | Poređenje eksperimentalnog i simulacionog odziva za upravljanje elevacije (PID) | 31 |
| 5.12 | Poređenje eksperimentalnog i simulacionog odziva za upravljanje azimuta (PID) | 32 |
| 5.13 | Eksperimentalni odziv za elevacioni ugao (Adaptivno upravljanje) | 33 |
| 5.14 | Eksperimentalni odziv za azimutni ugao (Adaptivno upravljanje) | 33 |

| | | |
|------|---|----|
| 5.15 | Poređenje eksperimentalnog i simulacionog odziva za upravljanje elevacije (Adaptivni regulator) | 34 |
| 5.16 | Poređenje eksperimentalnog i simulacionog odziva za upravljanje azimuta (Adaptivni regulator) | 34 |
| 5.17 | Eksperimentalni odziv za elevacioni ugao (SMC) | 35 |
| 5.18 | Eksperimentalni odziv za azimutni ugao (SMC) | 36 |
| 5.19 | Poređenje eksperimentalnog i simulacionog odziva za upravljanje elevacije (SMC) | 36 |
| 5.20 | Poređenje eksperimentalnog i simulacionog odziva za upravljanje azimuta (SMC) | 37 |
| 5.21 | Poređenje eksperimentalnog odziva svih regulatora za azimutni ugao | 38 |
| 5.22 | Poređenje eksperimentalnog odziva svih regulatora za elevacijski ugao | 38 |

Popis tabela

| | | |
|-----|------------------------------------|----|
| 3.1 | Parametri PID regulatora | 14 |
|-----|------------------------------------|----|

Poglavlje 1

Uvod

1.1 Opis problema

Problematika sa kojom se ovaj rad suočava predstavlja upravljanje jednog izrazito nelinearnog, inherentno nestabilnog sistema u stvarnom vremenu. Složenost sistema se ogleda i u zahtjevnosti identifikacije istog, što je dodatno otežano prisustvom međusprežnih efekata uvjetovanih upravljačkim aktuatorima. Naime, rad glavnog propelera je većinski zadužen za upravljanje elevacijskog ugla. Uprkos tome, njegov rad neizbježno generiše pomjeranje azimutnog ugla. Analogno vrijedi i za rad propelera zaduženog za pozicioniranje azimutnog ugla. Drugim riječima, rad jednog aktuatora neizbježno stvara smetnju pri radu drugog aktuatora i obratno. Stoga upravljačka komponenta treba da smanji međusprežni efekat i ostvari zadovoljavajuće praćenje respektivnih referentnih veličina. Praksa je pokazala da dobar pristup pri rješavanju ovakvih izazova jeste upotreba robusnih regulatora, konkretno regulatora zasnovanih na kliznim režimima. Odavde se nameće potreba za pravilnom konstrukcijom regulatora koji će osigurati stabilan rad sistema.

1.2 Pregled područja istraživanja

Jedno od ograničenja primjene klasičnih linearnih regulatora nad nelinearnim sistemima ogleda se u nemogućnosti osiguravanja pravilnog upravljanja u cijelom području rada. Štaviše, linearni regulatori su u stanju da operišu na zadovoljavajući način u nekoliko radnih tačaka. Odavde se nameće upotreba robusnih nelinearnih regulatora čije karakteristike ovise od karakteristika samog nelinearnog sistema kojim se nastoji upravljati. Teorijska podloga za izučavanje raznih metoda robusnog upravljanja je naročito bogata. U stručnim literaturama se navode različite metode sa opsežnim matematskim opisima, karakterizacijama prednosti i mana, te postupcima uspješne sinteze regulatora pripadajuće kategorije. Robusno upravljanje je oblast koja se rapidno razvija zbog toga što daje poboljšane performanse rada raznih sistema, a i često se jedan robusni regulator nadograđuje uvođenjem adaptivnih algoritama. Ovako generisan regulator daje zavidne rezultate u kontrastu sa klasičnim PID regulatorom. U konkretnom radu koristit će se SMC upravljanje. Za proučavanje ove oblasti upravljanja ponuđene su mnoge stručne literature ne samo od strane inženjera, već i matematičara. Zainteresovanost za izučavanje ovakvih sistema ne treba da iznenađuje, budući da je područje primjene ovakvih regulatora ogromna. Posebno kada se uzme u obzir ideja kombinovanja robusnih tehnika sa adaptivnim upravljanjem koje osigurava daleko bolje performanse, čak i za sisteme sa naglašenom nelinearnošću. Više informacija o temi se može naći u knjizi [1]. Za praktičnu realizaciju preporučuje se [2].

1.3 Motivacija

U sklopu prvog ciklusa studiranja, tematici upravljanja nelinearnim sistemama nije pridat preveliki značaj. Uprkos tome, činjenica je da je ogromna većina procesa kojim se nastoji upravljati nelinearna. Ovaj problem se može riješiti linearizacijom sistema oko radnih tačaka od interesa za upravljanje, te tako primijeniti teoriju linearnog upravljanja nad esencijalno nelinearnim sistemom. Ograničenja ovakvog postupka su eminentna. Standard upravljanja ovisi o kakvoći odabira radnih tačaka, te broja odabranih tačaka, tačnosti linearne aproksimacije sistema u odabranoj radnoj tački i sl. U svakom slučaju problem nelinearnosti nije riješen na sveobuhvatan način. Upotrebom nelinearnih regulatora nudi se prilika rješavanja problema upravljanja nelinearnih sistema. Pored toga od velike koristi je i izučavanje metoda kliznih režima kako su one u praksi pokazale dosljedne rezultate. Sinteza jednog regulatora je izuzetna prilika za uvođenje u opsežnu oblast nelinearnog upravljanja, koja će gotovo sigurno biti od koristi u nastavku studija. Ispravnost ove odluke će biti provjerena komparacijom rezultata SMC upravljanja sa linearnim PID regulatorom.

1.4 Zadaci i ciljevi istraživanja

Cilj rada jeste demonstracija upotrebe robusne metode upravljanja (SMC) za sintezu regulatora kao alata upravljanja nelinearnog laboratorijskog modela helikoptera. Prije toga predstaviti će se karakteristike fizičkog modela sistema, ukratko pojasniti postupak identifikacije parametara sistema, nakon čega će se pristupiti sintezi SMC, adaptivnog i PID regulatora u svrhu komparacije kvalitete upravljanja jednog sa drugim. Eksperimentalno istraživanje, kao i simulaciono, će biti izvršeno u Matlab programskom okruženju, tačnije Simulink - u. Težnja je izvući zaključke o primjenjivosti pojedinačnih regulatora na osnovu dobivenih odziva. Odavde će se moći ponuditi rješenja za nadogradnju upravljanja.

1.5 Struktura rada

Završni rad se sastoji do pet poglavlja, a u nastavku će se dati kratak opis svakog od njih.

Uvodni dio pojašnjava problem upravljanja koji se nastoji riješiti, te motivaciju koja stoji iza rješavanja spomenutog problema. Navode se područja istraživanja, postavljeni zadaci kao i ciljevi istraživanja, te struktura rada.

Drugo poglavlje opisuje karakteristike fizičkog, stvarnog helikopterskog modela. Pojašnjeni su principi generalnog upravljanja sistema, kao i postupak koji je upotrijebljen za identifikaciju kako modela tako i parametara tog modela.

Treće poglavlje osigurava teoretsku podlogu sistemima upravljanja. Navode se parametri PID regulatora koji se koristi za poređenje odziva. Nakon izlaganja bitnih pojmova slijedi sinteza robusnog regulatora.

Četvrto poglavlje opisuje praktičnu realizaciju robusnog regulatora temeljenog na SMC regulaciji, te ultimativno daje rješenje koje će se koristiti kako u simulaciji, tako i u eksperimentima.

Peto poglavlje rezervisano je za komentarisanje dobivenih simulacijskih i eksperimentalnih rezultata. Veoma kratko se pojašnjava princip rada adaptivnog regulatora, budući da ovo nije tema ovog rada.

Rad završava sa izlaganjem zaključka i nabrojanjem upotrijebljene literature.

Poglavlje 2

Opis sistema upravljanja

2.1 Uvod

Laboratorijski model helikoptera Humusoft CE 150 je sistem namijenjen za teoretsko izučavanje upravljanja nelinearnog dinamičkog sistema (slika 2.1 [3]).

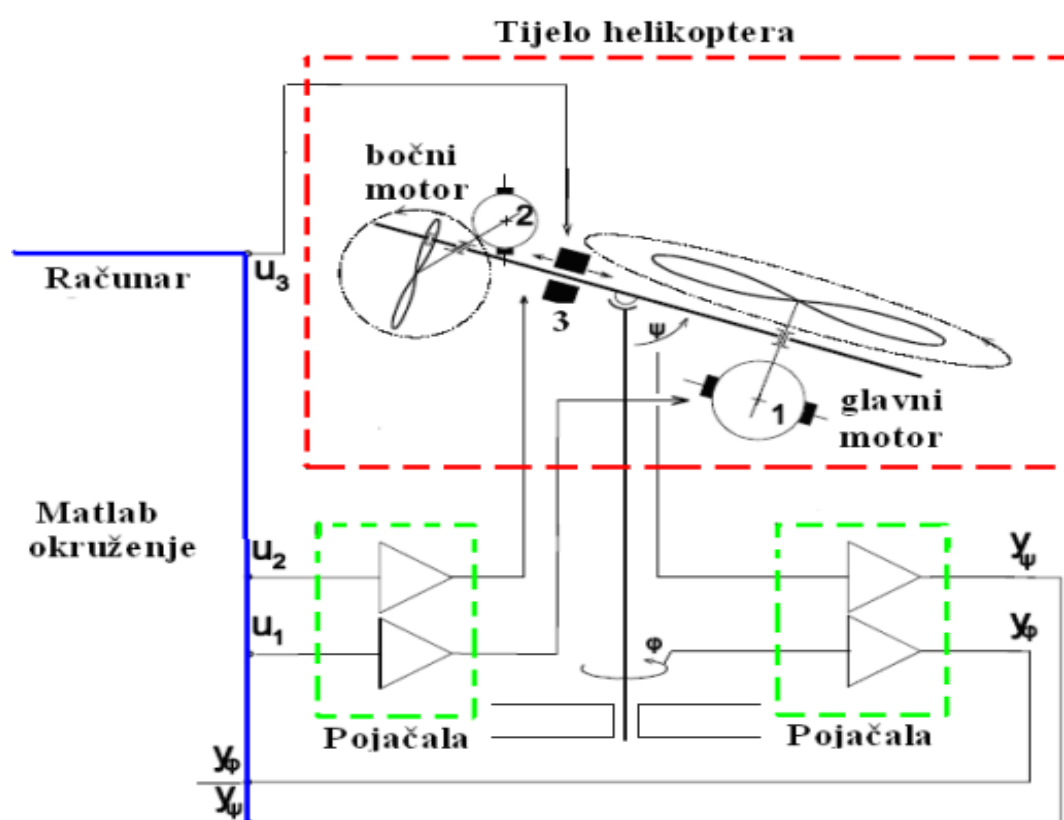


Slika 2.1: Fizički model sistema

Sistem se upravlja u stvarnom vremenu uz pomoć PC računara. Ovako implementiran sistem, otklanja nužnost uvođenja eksternih instrumenata za potrebe mjerenja značajnih signala, kako su te funkcije već unaprijed omogućene u sklopu softvera kojim se upravlja. Model se sastoji od tijela koje sadrži dva DC motora, koja pogone dva propelera. Senzori (enkoderi) su zaduženi za određivanje uglova elevacije i azimuta. Real Time Toolbox osigurava direktnu komunikaciju sistema sa Matlab programskim okruženjem. Analizirani sistem je multivarijabilni u smislu da posjeduje dva ulaza, te dva izlaza. Ulazi i izlazi su međusobno spregnuti [4]. Obezbeđena je i opcija promjene centra mase, što pruža dodatnu fleksibilnost pri ogledima.

2.2 Pojašnjenje sistema

Uproštena konfiguracija sistema je data slikom 2.2 [5]. Jasno je da se upravljački signali šalju koristeći Matlab. Ovi signali se naknadno pojačavaju i šalju ka dva DC motora. Glavni motor je zadužen za elevaciju, dok je bočni zadužen za ostvarivanje odgovarajućeg azimutnog ugla. Bitno je imati na umu, da usljed međusprežnih efekata, rad bočnog motora ima utjecaj na rad glavnog i obrnuto. Ovo predstavlja dodatni izazov kako pri identifikaciji sistema, tako i pri pokušaju upravljanja istog. Treći ulaz, koji u ovom radu nije korišten, pokreće servomehanizam koji mijenja centar ravnoteže. Ovo može biti korisno za proučavanje kretanja helikoptera pri različitim raspodjelama mase. Sistem koristi enkodere kao svoje senzore. Podaci koje očitaju enkoderi se dalje šalju ka računar na obradu. Helikopter je namijenjen za upotrebu u laboratorijskom okruženju pri temperaturama od 5 °C do 40 °C. Za rad potrebno je obezbijediti i napon u rasponu od 100 VAC do 240 VAC, sa snagom do 400 W, frekvencijom od 50 Hz, sa uzemljenjem.



Slika 2.2: Shematski prikaz modela helikoptera

Veličine prikazane na slici 2.2 su:

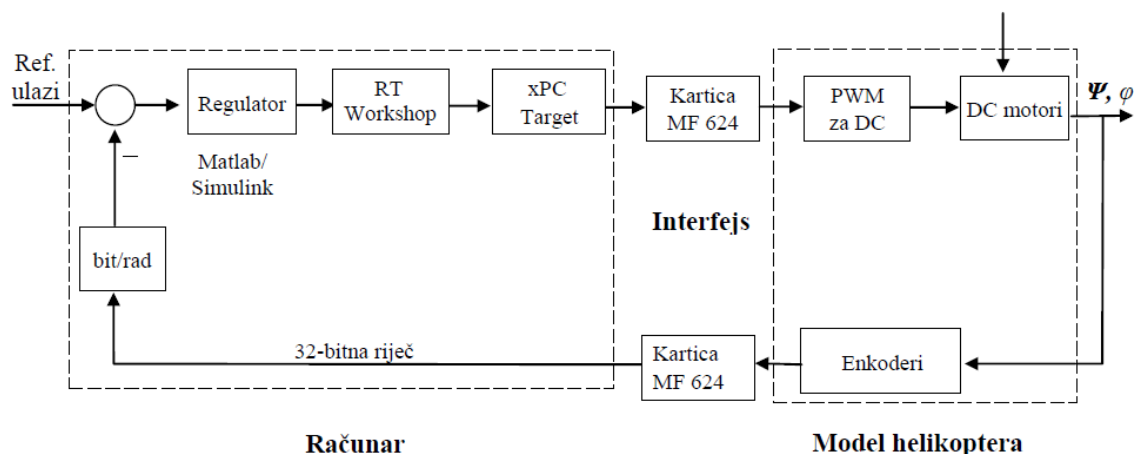
- u_1, u_2, u_3 - vrijednosti upravljačkih varijabli za DC i servo motore,
- Ψ - elevacijski ugao,
- φ - azimutni ugao,
- Y_Ψ - digitalna reprezentacija elevacijskog ugla,
- Y_φ - digitalna reprezentacija azimutnog ugla [5].

Specifikacije fizičkog modela:

1. Dužina helikoptera iznosi 300 mm (bez propelera), 360 mm (sa propelerom).
2. Visina helikopterskog modela je 510 mm.
3. Baza helikoptera ima dimenzije 300 x 300 mm, a helikopter se nalazi u kavezu dimenzija 800 x 800 x 800 mm.
4. Težina helikoptera iznosi 3.5 kg [5].
5. Interfejs uređaj je dimenzija 480 x 140 x 307 mm, 5 kg [3].
6. Helikopter ima područje rada od ± 135 stepeni za elevacioni ugao.
7. Helikopter ima područje rada od ± 45 stepeni za azimutni ugao.

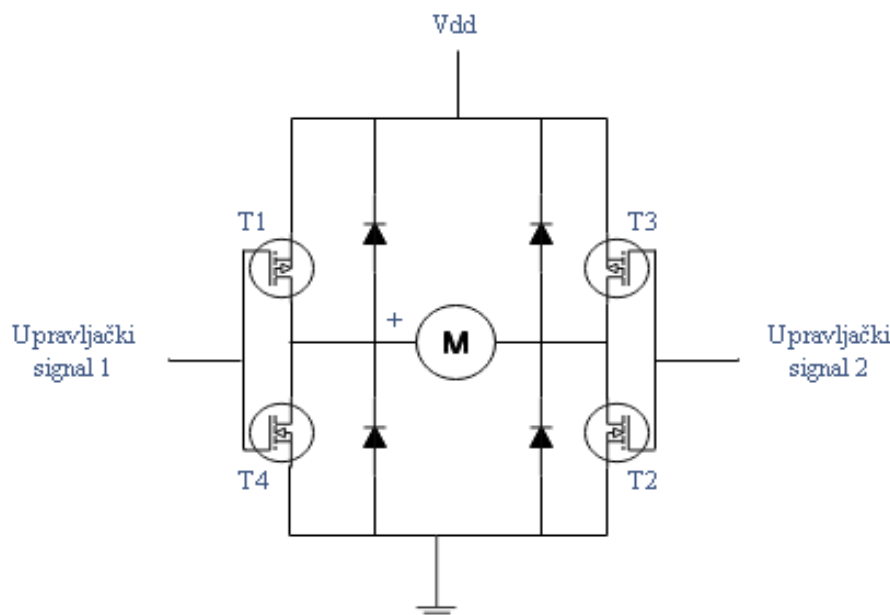
Real Time Workshop ili skraćeno RTW je dio softverskog paketa Matlab / Simulink i koristi se za prevođenje varijabli iz Simulink - a u podatke razumljive sistemu za rad u realnom vremenu. Pri komunikaciji između računara i modela helikoptera ključnu ulogu igra i višefunkcionalna kartica MF 624 koja prevodi upravljačke signale računara u signale koji se dalje šalju DC motorima. Princip upravljanja motora se bazira na širinsko impulsnoj modulaciji (eng. PWM - Pulse Width Modulation).

Prikaz sistema upravljanja laboratorijskim modelom helikoptera dat je na slici 2.3. Predočeni sistem upravljanja se sastoji od 3 komponente: računara, interfejsa i modela helikoptera. Model helikoptera se sastoji od tijela helikoptera, motora, enkodera i pojačala za generiranje PWM signala. Računar se koristi za odašiljanje upravljačkih signala i obrade povratnih informacija. Interfejs obezbjeđuje neometanu komunikaciju računara sa helikopterom [5].



Slika 2.3: Shema upravljanja modelom helikoptera

Promjena smjera je postignuta upotrebom H - most konfiguracije (slika 2.4).



Slika 2.4: Univerzalna shema H - most spoja

Provođenjem tranzistora T1 i T2 (T3 i T4 ne vode) motor se vrti u jednom smjeru, a provođenjem tranzistora T3 i T4 (T1 i T2 ne vode) u drugom smjeru. Diode ovdje imaju zaštitnu ulogu. U nastavku će se objasniti model helikoptera.

2.3 Matematski model helikoptera

Postupak sinteze regulatora najčešće podrazumijeva podešavanje parametara regulatora u simulacionom okruženju. Prednosti ovog načina se ogledaju u sljedećim stavkama:

- Smanjene cijene troškova: U općem slučaju, simulacijsko testiranje je dosta isplativije od izvođenja eksperimenata nad stvarnim sistemom. Izgradnja stvarnog sistema, njegovo održavanje, kao i njegovo pokretanje, sve od navedenog iziskuje određeni novac. S druge strane, simulacijska testiranja su u generalnom slučaju dosta brža, ali i jeftinija.
- Simulacijska testiranja su sigurnija i smanjuju rizik od povreda, kako opreme, tako i čovjeka.
- Brzina izvršavanja simulacije obezbjeđuje brzo razvijanje optimalnog regulatora. Prepravljanje parametara regulatora, testiranje njegovog rada, kao i kreiranje alternativnih rješenja zahtijeva dosta manje vremena u odnosu na vrijeme koje bi moralo biti uloženo sprovođenjem eksperimenta.
- Simulacije pružaju jednostavnu manipulaciju radnih uslova. Uz pomoć simulacije testiraju se scenariji koji mogu biti štetni po opremu i koji se inače ne mogu testirati na stvarnom sistemu.
- Laka ponovljivost, kao i mogućnost spašavanja simulacijskih rezultata

Kako kreiranje matematskog modela predstavlja zaseban problem za sebe, u ovom radu će se preuzeti gotov model predstavljen u [5]. U nastavku će se dati generalne smjernice kako se

došlo do predloženog modela.

Matematski model može biti određen eksperimentalnom, ili teorijskom analizom, ili njihovom kombinacijom [5]. Teoretska analiza daje detaljan opis ponašanja stvarnog sistema, ali kao takva je veoma zahtjevnja, budući da podrazumijeva opsežno znanje o fizikalnosti sistema koji se nastoji modelirati. Za konkretni helikopterski model teorijskom analizom se dobije model čiji parametri ne opisuju rad sistema isuviše tačno. Ovo nadalje znači da takav model ne smije biti upotrijebljen za sintezu regulatora. Umjesto toga odlučeno je koristiti eksperimentalnu analizu, koja daje zadovoljavajuće rezultate. Uvest će se pojednostavljenje modela helikoptera, ne dozvoljavanjem promjene centra mase. Ovo znači da sada sistem ima samo dva ulaza u_1 i u_2 (napon glavnog i bočnog motora, respektivno). Helikopter ima dva stepena slobode: elevacijski ugao (ψ) i azimutni ugao (ϕ), koji ujedno predstavljaju i dva izlaza (mjeranim u radijanima). Ose propelera su ortogonalne jedna na drugu. Diferencijalne jednačine koje opisuju sistem dobivene su korištenjem II Njutonovog zakona.

Kretanje helikoptera u vertikalnoj i horizontalnoj osi definirano je jednačinom momentne ravnoteže:

$$I\ddot{\psi} = \tau_1 + \tau_\phi + \tau_G - \tau_m - \tau_{f_1} \quad (2.1)$$

gdje je:

τ_ϕ - centrifugalni moment [Nm],

τ_G - žiroskopski obrtni moment [Nm],

τ_m - gravitacijski obrtni moment [Nm],

τ_{f_1} - momenti viskoznog i Coulombovog trenja [Nm],

τ_l - moment stvoren rotacijom glavnog propelera [Nm],

I - moment inercije tijela helikoptera uslijed rotacije oko horizontalne osi [$\frac{kg}{m^2}$].

Momente iz jednačine 2.1 opisuju izrazi:

$$\tau_1 = k_{\omega_1} \omega_1^2 \quad (2.2)$$

$$\tau_\phi = ml\dot{\phi}^2 \sin\psi \cos\psi \quad (2.3)$$

$$\tau_G = k_G \dot{\phi} \omega_1 \cos\psi \quad (2.4)$$

$$\tau_m = F_m l \sin\psi = mgl \sin\psi \quad (2.5)$$

$$\tau_{f_1} = C_\psi \text{sign}\dot{\psi} + B_\psi \dot{\psi} \quad (2.6)$$

Jednačina koja modelira dinamiku azimuta glasi:

$$I_\psi \ddot{\phi} = \tau_2 - \tau_r - \tau_{f_2} \quad (2.7)$$

gdje vrijedi:

τ_2 - moment uslijed stabilizacije motora [Nm],

τ_r - reakcioni moment glavnog motora,

τ_{f_2} - momenti viskoznog i Colombovog trenja [Nm].

Vrijedi i:

$$I_\psi = I \sin \psi \quad (2.8)$$

$$\tau_{f_1} = C_\phi \text{sign} \dot{\phi} + B_\phi \dot{\phi} \quad (2.9)$$

$$\tau_{f_2} = k_2 l_2 \sin \psi \omega_2^2 \quad (2.10)$$

Dinamiku DC motora utvrđena je jednačinama:

$$i = \frac{1}{R}(u - K_b \omega) \quad (2.11)$$

$$\tau = K_i i \quad (2.12)$$

$$\tau_c = C \text{sign} \omega \quad (2.13)$$

$$\tau_p = B_p \omega + D_p \omega \quad (2.14)$$

$$I \dot{\omega} = \tau - \tau_c - \tau_p - B \omega \quad (2.15)$$

gdje je:

i - trenutna struja [A],

u - upravljački ulazni napon[V],

R - otpornost armature motor [Ω],

K_b - konstanta protuelektromotornesile [Vs],

ω - ugaona brzina rotora [$\frac{rad}{s}$],

τ - pogonski moment motora [Nm],

K_i - momentna konstanta [$\frac{Nm}{A}$],

τ_c - moment tereta i moment uslijed Coulombovog trenja [Nm],

C - koeficijent Coulombovog trenja [Nm],

τ_p - moment otpora zraka [Nm],

B_p - koeficijent otpora zraka (laminarni tok),

D_p - koeficijent otpora zraka (turbulentni tok),

I - moment trenja rotora i propelera [kgm^2],

B - koeficijent viskoznog trenja [Nms].

Jednačine momenta opisuju karakteristike propelera:

$$\tau_1 = K_{\omega_1} \omega_1^2 \text{sign}(\omega_1) \quad (2.16)$$

$$\tau_2 = K_{\omega_2} \omega_2^2 \text{sign}(\omega_2) \quad (2.17)$$

gdje je:

ω_1 - ugaona brzina glavnog propelera [$\frac{rad}{s}$],

τ_1 - ugaoni moment uslijed rada glavnog propelera [Nm],

ω_2 - ugaona brzina stabilizirajućeg propelera [$\frac{rad}{s}$],

τ_2 - azimutni moment uslijed djelovanja repnog propelera [Nm].

Apsolutni enkoder se smatra linearanim za radno područje. MU (eng. machine unit) je oznaka za mašinske jedinice. Izrazi koji definišu enkoder dati su u nastavku:

$$y_\psi = k_\psi \psi + y_{\psi_0} \quad (2.18)$$

$$y_\varphi = k_\varphi \varphi \quad (2.19)$$

gdje je:

ψ - elevacija [rad],

y_ψ - elevacija [MU],

k_ψ - elevacijska konstanta [$\frac{MU}{rad}$],

y_{ψ_0} - senzor elevacije sa pomjerajem od $\psi = 0$,

φ - azimut [rad],

y_φ - azimut [MU],

k_φ - azimutna konstanta [$\frac{MU}{rad}$].

Korištena pojačala opisana su linearnom funkcijom:

$$u_a = Ku \quad (2.20)$$

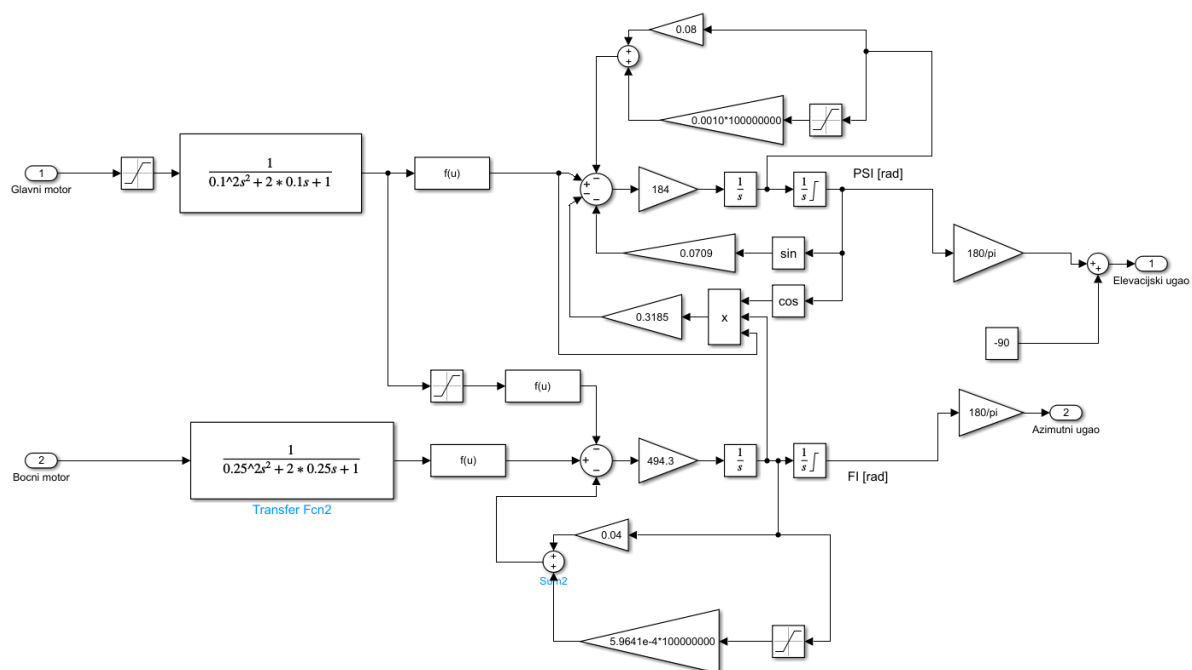
gdje je:

u - izlazna vrijednost iz računara [MU],

u_a - napon armature [V],

K - vrijednost pojačanja [$\frac{V}{MU}$].

Na osnovu ovih jednačina dobijen je teoretski model sistema čije je parametre potrebno odrediti putem identifikacije. Identifikacija parametara motora vršena je na više načina: primjenom genetskih algoritama, posmatranjem odziva sistema na unaprijed poznate ulaze i direktnim mjerenjem parametara. Nakon sređivanja prethodno navedenih relacija kao rezultat dobija se Simulink model prikazan na slici 2.5. Ovaj model će se koristiti u simulaciji za imitaciju ponašanja stvarnog sistema.



Slika 2.5: Konačni model helikoptera u okruženju Simulink

* * *

Ovo poglavlje nudi kratak uvid u fizikalnost helikopterskog modela, kao i fizičke karakteristike koje se pripisuju sistemu. Navedene su jednačine koje su pružile priliku kreiranja kvalitetnog modela za potrebe simulacije. Ukratko je opisan način identifikacije parametara sistema, nakon čega je dat krajnji model sistema. Tek nakon mukotrpnog procesa modeliranja helikopterskog sistema je moguće baviti se izučavanjem metoda upravljanja koje će ultimativno dovesti do sinteze regulatora.

Poglavlje 3

Sistemi upravljanja

3.1 Uvod

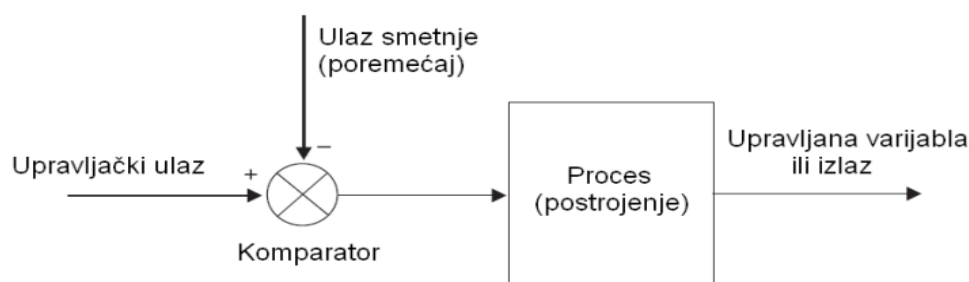
Pristupanje sintezi regulatora zahtijeva dobro poznavanje pojma sistema upravljanja, kao i tipa regulatora koji će biti primijenjen. Više o ovome u nastavku.

3.2 Sistem

Definicija sistema nije jednoznačna i kao takva, ovisi o području oblasti unutar koje se radi istraživanje. Za potrebe ovog rada riječ sistem će podrazumijevati dinamički tehnički sistem. Ovakav sistem definira vezu između pobude i odziva preko skupa matematičkih relacija [6]. U općem slučaju relacije mogu da budu nelinearne, algebarske, diferencijalne... Ovo u potpunosti ovisi od realnog sistema koji se nastoji modelirati radi potreba simulacije. Postavljanjem zakonitosti između ulaza i izlaza iz sistema pokušava se aproksimirati ponašanje nekog realnog (stvarnog) sistema. Postoje razne vrste sistema čija podjela se vrši po različitim kriterijima.

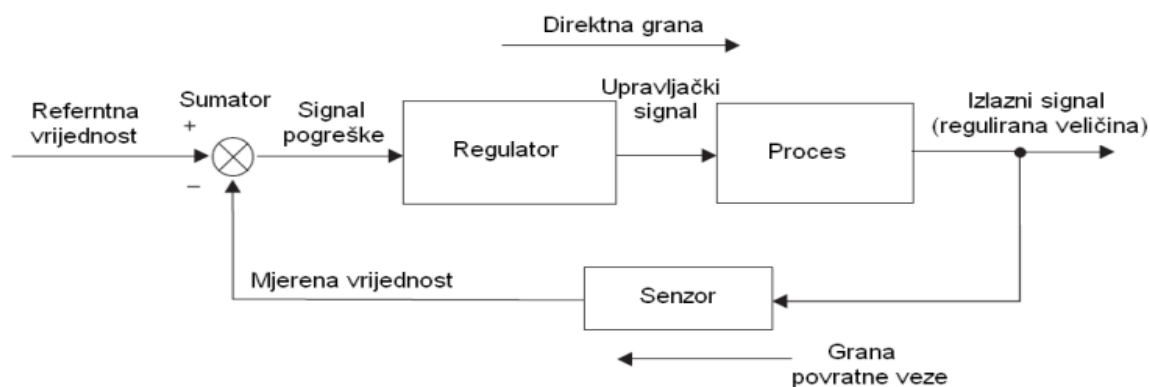
3.3 Sistemi upravljanja

U najopćenitijem smislu, sistemi upravljanja se mogu podijeliti na otvorene sisteme upravljanja i sisteme upravljanja u zatvorenom. Upotreba otvorenih sistema upravljanja je opravdana isključivo za jednostavne operacije. Za ovakve sisteme rezultati upravljanja u potpunosti ovise od kvalitete modeliranja procesa kojim se nastoji upravljati. Prirodno je zaključiti da ovakvo upravljanje ima veoma malo primjena, budući da za pravilan rad podrazumijevaju potpuno odsustvo smetnji ili savršeno poznavanje matematičkog oblika smetnji [7]. Generalna shema ovog upravljanja je data slikom 3.1.



Slika 3.1: Sistem otvorenog upravljanja u općem slučaju

Ono što se zapravo koristi dosta često u inženjeringu je upravljanje u zatvorenom (slika 3.2 [7]). Za ovo upravljanje potreban je barem jedan regulator i jedan senzor. Regulator treba da šalje upravljačke signale koji za cilj imaju minimizaciju greške između izlaza iz sistema i zadane referentne veličine ($e \approx 0$). Ovakav sistem je dosta otporniji na utjecaje smetnji, efekat promjene parametara procesa ima manji utjecaj na kvalitetu rada, ali šum mjerenja senzora može dovesti do degradacije performansi, kao i do pojave nestabilnosti ako sistem nije dobro projektovan [7].



Slika 3.2: Sistem zatvorenog upravljanja u općem slučaju

3.4 PID regulator

3.4.1 Uvod

Značajan dio napisanog o PID regulaciji je preuzeto iz projekta rađenog u sklopu predmeta Praktikum automatske i informatike [8]. Princip regulacije se zasniva na zadavanju referentne veličine koju sistem treba da dosegne poštujući unaprijed zadane uslove. Među ovim uslovima izdvajaju se pojmovi kao što su minimalni prebačaj, odnosno podbačaj odziva, brzo praćenje promjene upravljačkog signala zadane veličine sa unaprijed određenom greškom. Regulator ima zadatke da kroz korektivne radnje zadovolji prethodno nametnute zahtjeve.

3.4.2 O regulatoru

PID regulator posjeduje tri komponente koje zajedno osiguravaju upravljanje nad sistemom: proporcionalna, integralna i derivaciona. Odatle potječe i naziv regulatora. Regulator se definiše matematskom jednačinom koja povezuje njegov ulaz i izlaz, a data je relacijom 3.1.

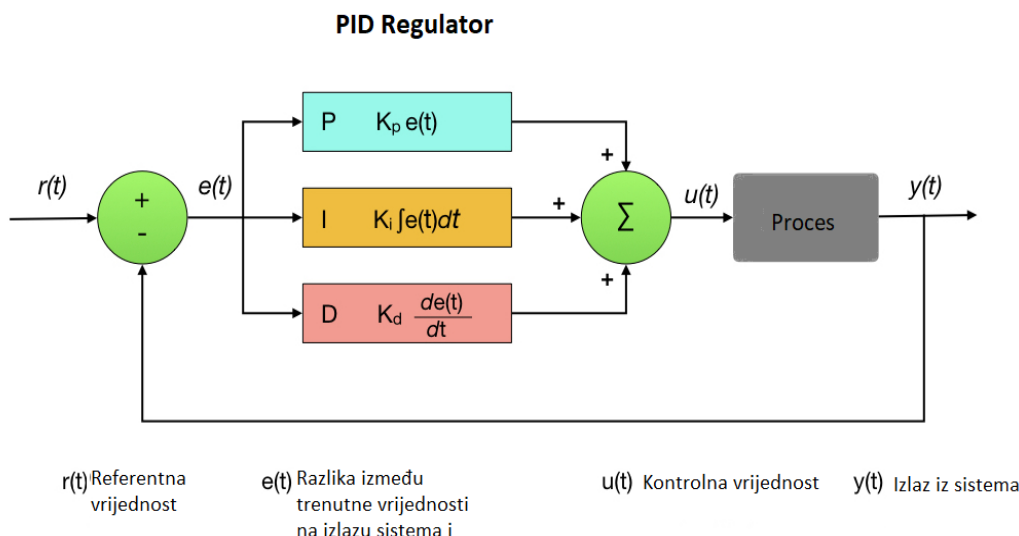
$$x(t) = K_p \cdot [u(t) + \frac{1}{T_i} \cdot \int_0^t u(t)dt + T_d \cdot \frac{du(t)}{dt}] \quad (3.1)$$

Navedene veličine su:

- K_p - koeficijent pojačanja
- T_i - integralna vremenska konstanta
- T_d - derivativna vremenska konstanta
- $x(t)$ - izlaz iz PID regulatora

- $u(t)$ - ulaz u PID regulator (najčešće je to greška između referentne i mjerene / trenutne veličine od interesa)

Na slici 3.3 prikazan je sistem automatskog upravljanja sa PID regulatorom.



Slika 3.3: Blokovska struktura sistema automatskog upravljanja sa PID regulatorom

Razmotrit će se efekti pojedinačnih komponenti PID upravljačkog sistema.

Proporcionalni regulator daje linearnu vezu između izlaza regulatora i ulaza u regulator (greške), što se jasno vidi iz prvog sabirka u jednačini 3.1. Ovaj regulator okarakterisan je dobrom stabilnošću, a i u stanju je ubrzati spore odzive sistema. S druge strane, P komponenta sama po sebi nije dovoljna da eliminiše razliku između zadane i stvarne veličine upravljanja (tj. ne može je smanjiti na prihvatljiv nivo). Povećavanjem utjecaja P komponente povećavaju se i maksimalni prebačaji / podbačaji u sistemu. Uvođenjem I parametra poboljšavaju se performanse regulatora.

Integralna komponenta eliminiše postojanje greške u stacionarnom stanju, a matematska relacija kojom je upisana je predstavljena drugim sabirkom u relaciji 3.1. Eliminacija stacionarne greške se plaća usporavanjem brzine odziva sistema kojim se upravlja.

Derivaciona komponenta (treći sabirak relacije 3.1) prevazilazi ovo ograničenje tako što predviđa ponašanje greške, posljedično povećavajući brzinu odziva sistema.

Ovaj regulator se u praksi koristi za upravljanje linearnih ali i nelinearnih sistema, pri čemu se za posljednje rijetko koristi sam PID regulator, već biva integrisan u sklopu nekog složenijeg algoritma upravljanja. U nastavku ovog rada bit će pojašnjene manjkavosti primjene osnovne PID regulacije na nelinearnim sistemima, te kako zaobići nedostatke PID regulacije koristeći adaptivno upravljanje.

3.4.3 Implementacija PID regulatora

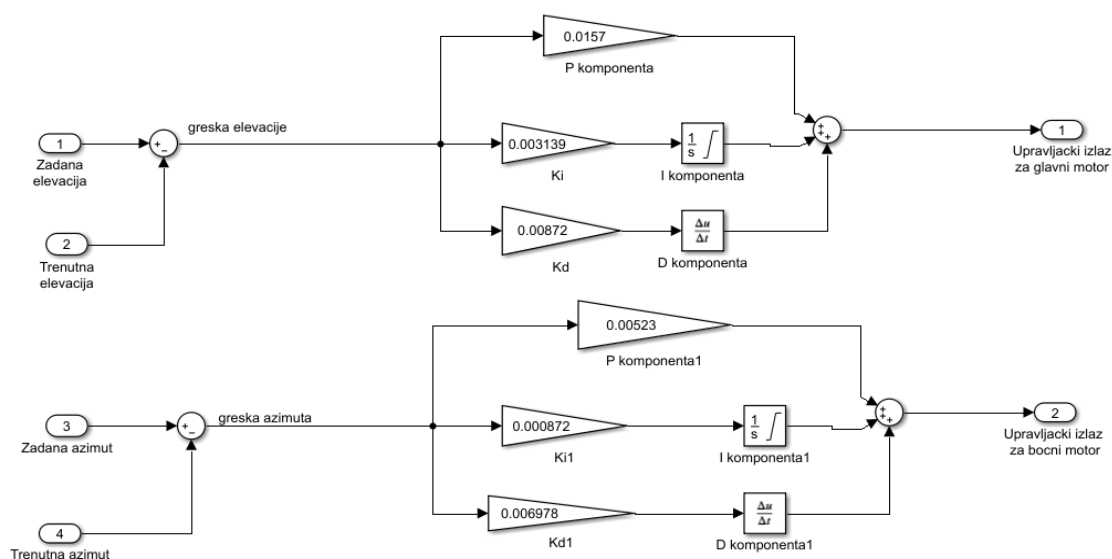
Podešavanje PID regulatora može biti urađeno koristeći jedan od navedenih načina:

- Eksperimentalno podešavanje - Podrazumijeva ručno podešavanje parametara nad stvarnim sistemom sve dok se ne postigne željeni učinak. Efikasnost metode ovisi o iskustvu inženjera.
- Podešavanje na temelju prethodno obavljenih simulacijskih eksperimenata - Principijelno identičan metod prethodnom, izuzev toga što se eksperiment izvršava u simulacijskom orkuženju, a ne na stvarnom, fizičkom sistemu.
- Analitičko podešavanje - Upotrebljava neke od provjerenih metoda sinteze iz područja algebarske teorije sistema. Zahtjeva detaljan i precizan matematički model koji vjerodostojno opisuje dinamiku sistema.
- Automatsko podešavanje - Eksperiment se obavlja potpuno automatizovano, a na temelju prethodno definisanog algoritma biraju se vrijednosti parametara regulatora koji se podešavaju. Podešavanje se zaustavlja kada se postigne određeni kriteriji.

Za ovaj rad parametri PID - a su tempirani upotrebom simulacionog okruženja, ne koristeći stručne metode podešavanja, već iskustvenim prepodešavanjem koeficijenta. Shema je predstavljena slikom 3.4. Očividno se upravljački sistem sastoji od dva PID regulatora, od kojih je jedan tu zadužen za upravljanjem elevacionim uglom, a drugi azimutnim uglom. Konačne vrijednosti parametara za PID regulatore locirane su u tabeli 3.1.

Tabela 3.1: Parametri PID regulatora

| | K_p | K_i | K_d |
|--------------------|---------|----------|----------|
| elevacijski | 0.0157 | 0.003139 | 0.00872 |
| azimutni | 0.00523 | 0.000872 | 0.006978 |



Slika 3.4: Struktura PID regulatora sa podešenim parametrima

Analiza simuliranog odziva bit će data u poglavlju 5.

3.5 Robusno upravljanje

Potreba za razvijanje teorije robusnog upravljanja se pojavljuje kao nuspojava nesavršenosti matematskih opisa mnogih procesa. Ove nesavršenosti mogu biti proizvod nedovoljno dobro urađene identifikacije procesa kojim se želi upravljati, djelovanja nepredviđenih okolnosti, utjecaj smetnji i sl. Razlike između stvarnog i matematskog modela koje proizlaze iz ovih razloga otežavaju dizajn regulatora, imaju utjecaj na dosljednost odziva kao i na stabilnost cjelokupnog sistema. Cilj teorije robusnog upravljanja je stvaranje regulatora koji pruža zadovoljavajuće performanse, uprkos prisutnosti nesigurnosti u sistemu. Štaviše, teži se kreiranju upravljačkog zakona koji ima jasno definisane okvire rada unutar kojih se osigurava ispravnost sistema [9]. Jedna od robusnih metoda upravljanja predstavlja SMC regulacija, o čemu će biti više govora u nastavku.

3.6 Upravljanje korištenjem kliznih režima

Klizni režimi (SMC, eng. Sliding Mode Control) predstavljaju robusne metode upravljanja koje su se pokazale kao izrazito uspješan pristup suočavanjima sa ograničenim smetnjama i parazitnom dinamikom sistema [1]. Ideja iza SMC - a je uvođenje funkcije koja se naziva kliznom varijablom. Prilikom upravljanja klizna varijabla se kreće iz slobodnog početnog položaja ka kliznoj površi (u općem slučaju). Ova površ jako često ovisi od trenutne greške, ili izvoda te greške. Sinteza SMC regulatora obično se sastoji od dvije faze [2]:

1. Faza 1: Dizajn klizne površi
2. Faza 2: Dizajn klizne varijable

Nelinearni sistem se može predstaviti u obliku prostora stanja i to kao:

$$\dot{x} = f(x, t) + g(x, t) \cdot u \quad (3.2)$$

$$y = c(x, t) \cdot u \quad (3.3)$$

gdje y i u predstavljaju izlazne i ulazne vektore, respektivno.

Prva faza je definisanje skalarne funkcije sistema kao:

$$\delta(x) : R^n \rightarrow R \quad (3.4)$$

Kao što je istaknuto ranije klizna površ ovisi od greške praćenja i nekih od njenih izvoda:

$$\delta = \delta(e, \dot{e}, \dots, e^k) \quad (3.5)$$

Funkcija δ treba biti odabrana na takav način da ona teži nuli nakon nekog vremena, tako osiguravajući stabilno ponašanje cjelokupnog sistema za veći opseg. Neki od najčešćih oblika definisanja klizne površi će biti izložene u naredne tri relacije.

$$\delta = \dot{e} + c_0 e \quad (3.6)$$

$$\delta = \ddot{e} + c_1 \dot{e} + c_0 e \quad (3.7)$$

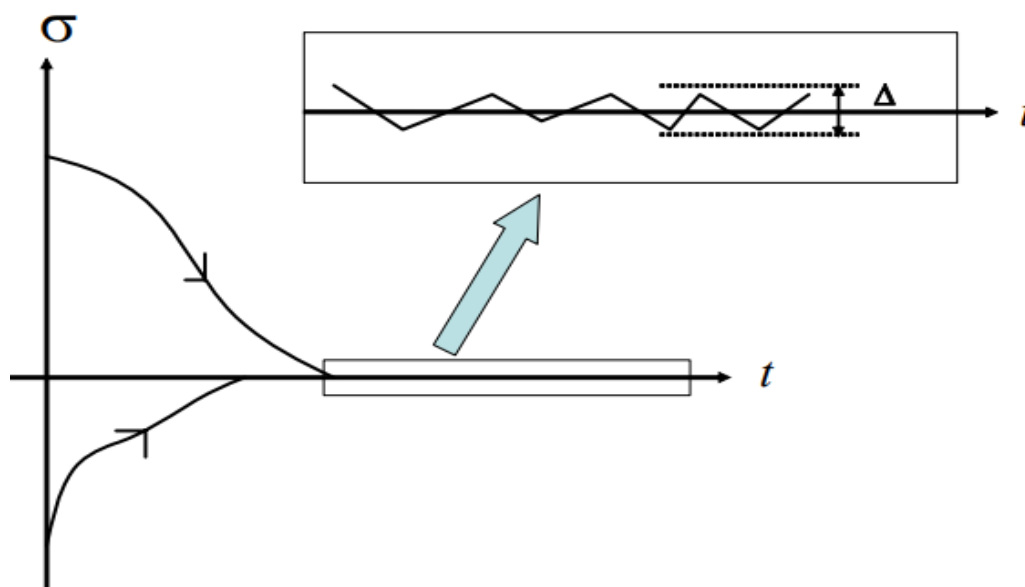
$$\delta = e^k + \sum_{i=0}^{k-1} c_i e^i \quad (3.8)$$

Parametar k se određuje kao $r-1$, gdje r predstavlja apsolutnu razliku najvećeg stepena polinoma izlaza i najvećeg stepena polinoma ulaza. Tipična forma klizne ravni je definisana greškom e i parametrom p :

$$\delta = \left(\frac{d}{dt} + p\right)^k e \quad (3.9)$$

Odabir parametra p je takav da kreira pol koji "smanjuje dinamiku" sistema kada se kreće po kliznoj površi.

Druga faza podrazumijeva odabir kontrolne akcije koja je u stanju da usmjeri putanju sistema ka kliznoj površi. Drugim riječima potrebno je kreirati kontrolu takvu da varijabla δ teži nuli u nekom konačnom vremenskom intervalu. O primjerima kontrole sistema više u poglavlju 4. Pored prethodno navedenog, istaknut će se i problem chattering - a (ilustriranog na slici 3.5 [2]) koji se javlja pri upotrebi SMC regulatora. Chattering se javlja kao konzekvenca visokofrekventnog oscilovanja kontrolnog signala oko klizne površi. Ovo se u odzivu manifestuje kao rapidno oscilovanje oko željene trajektorije (referentnog signala). Jedan od uzroka ovog ponašanja je diskretna priroda upravljačkog alata (većina upravljanja se danas radi preko procesorskih jedinica, čiji signali su inherentno digitalni). Drugi krivac mogu biti amplitudno suviše jaki signali, ili prosto nedovoljno dobar model upravljanja ili prisutnost snažnih smetnji.



Slika 3.5: Problem chattering - a

Poglavlje 4

Sinteza robusnog regulatora

4.1 Uvod

Nakon izlaganja teorijske podloge o regulatoru koji koristi klizne režime, pristupa se konstrukciji jednog takvog upravljačkog sistema. Navest će se različite varijante regulatora koje su uzete u razmatranje te njihove prednosti, odnosno mane. Za ovo poglavlje veliki značaj imao je rad [2], koji je na kraju i obezbijedio uspješnu sintezu regulatora. Slike date u prilogu, zajedno sa jednačinama, trebale bi da budu dovoljne za potpuno shvatanje postupka razvoja regulatora koji je naposljetku i iskorišten na stvarnom sistemu.

4.2 Klizni režim upravljanja prvog reda

Kontrola sistema je opisana funkcijom sgn definisanom kao:

$$\text{sgn}(x) = \begin{cases} 1 & x > 0 \\ 0 & x = 0 \\ -1 & x < 0 \end{cases} \quad (4.1)$$

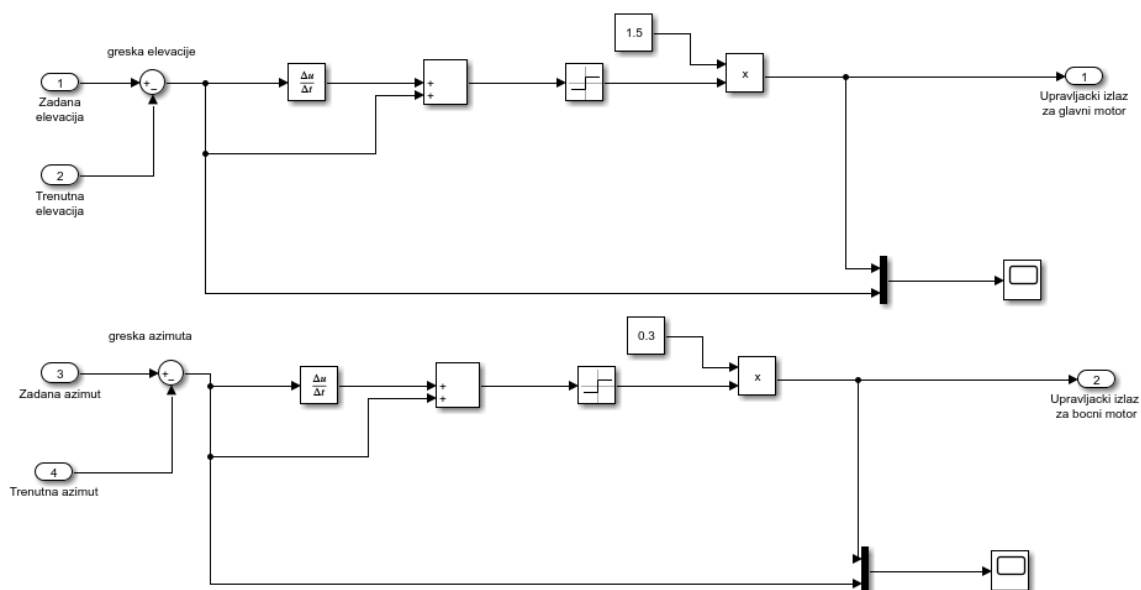
Algoritam za klizno upravljanje prvog reda može se opisati:

$$u = U \text{sgn}(\delta) \quad (4.2)$$

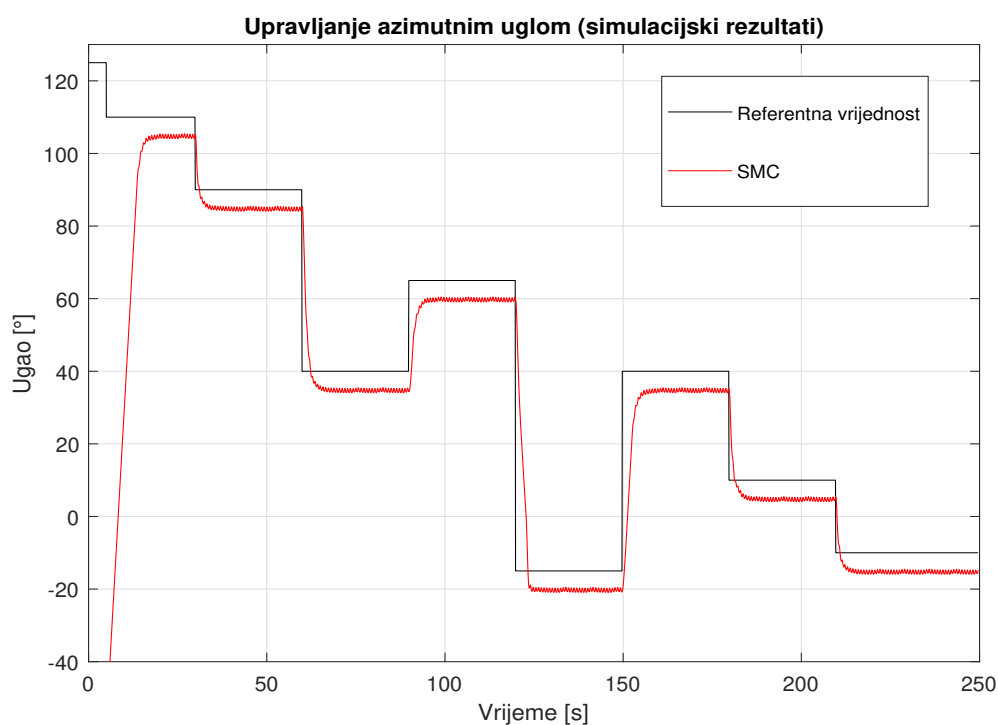
U je pozitivna konstanta koja se određuje eksperimentalno, sve dok se ne dobije željeni odziv. δ je funkcija koja ovisi od greške i može imati različite oblike, a ovdje je uzeto da je $\delta = e + \dot{e}$, gdje je e greška upravljanja. Metoda je odlikovana izrazitom jednostavnošću. Upravljački signal ima jednostavan analitički oblik i šalje se direktno na aktuator (u ovom slučaju postoje dva aktuatora, bočni i glavni motor).

Glavni metod validacije ispravnosti regulatora, pored testiranja istog na pravom sistemu, jeste pokretanja simulacije. Kako je model helikoptera poznat, lako je napraviti Simulink shemu i provjeriti ponašanja elevacijskog i azimutnog ugla u odnosu na njima pripadajuće zadane vrijednosti. Na slici 4.1 može se vidjeti kako je SMC regulator prvog reda realizovan u Simulink-u. Pokretanjem simulacije dobijaju se odzivi dati na slikama 4.3 i 4.2. Prilikom podešavanja parametara regulatora, nisu se uspjeli postići zadovoljavajući odzivi kako elevacijskog tako i azimutnog ugla. Prije svega vidi se nemogućnost dostizanja referentne vrijednosti sa greškom manjom od 5 %. Način na koji bi se ovaj problem mogao zaobići jeste upotrebom korekcionog

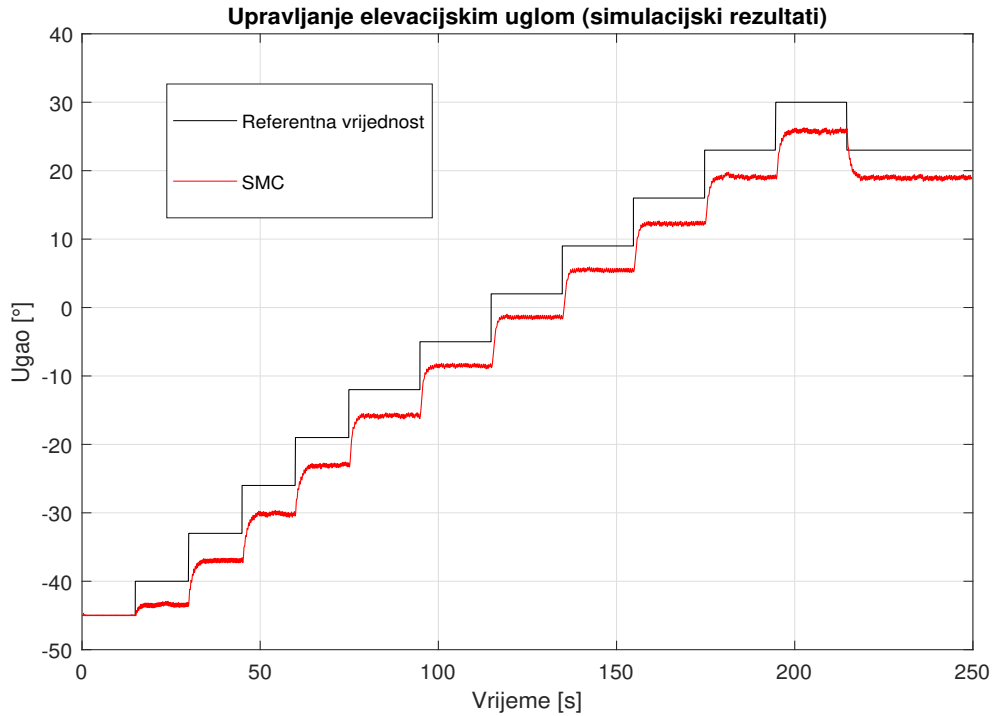
faktora koji bi podigao odziv na takav način da greška bude tolerantna. Zbog inherentne nestabilnosti helikopterskog modela, kao i zbog problema na koje se nailazi pri praktičnoj realizaciji upravljanja, ovaj vid upravljanja nije testiran na stvarnom sistemu.



Slika 4.1: Simulink shema SMC regulatora prvog reda



Slika 4.2: Simulacijski rezultati upravljanja azimuta sa SMC regulatorom prvog reda



Slika 4.3: Simulacijski rezultati upravljanja elevacije sa SMC regulatorom prvog reda

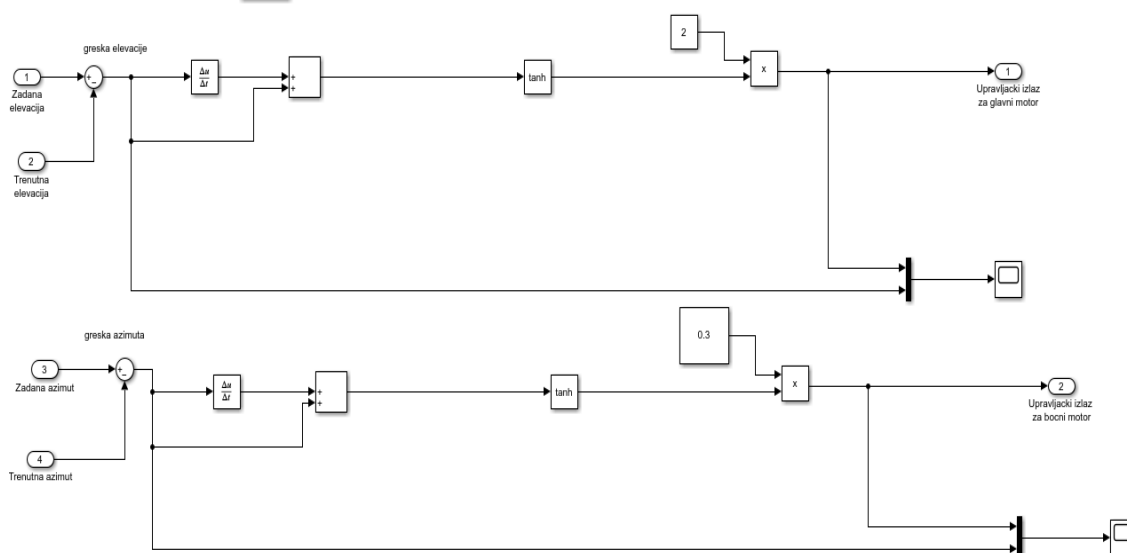
4.3 Klizni režim upravljanja prvog reda sa aproksimacijom signum funkcije

Za klizne režime upravljanja prvog reda veliki problem predstavlja fenomen chattering - a. Preciznije rečeno, visokofrekvencijsko upravljanje koje se tada javlja ne predstavlja problem za električne signale, s obzirom na činjenicu da tehnologija dozvoljava brzu promjenu naponskih / strujnih signala. Problem nastaje kada aktuatori nisu u stanju da prate upravljačke signale, što može izazvati havariju, bilo po opremi ili po kvaliteti upravljanja. Imajući to u vidu pokušava se smanjiti utjecaj diskontinuirane funkcije sgn sa nekom, njoj srodnom, kontinualnom aproksimacijom. Jednačine 4.3 i 4.4 su neke od predloženih oblika upravljačkog zakona.

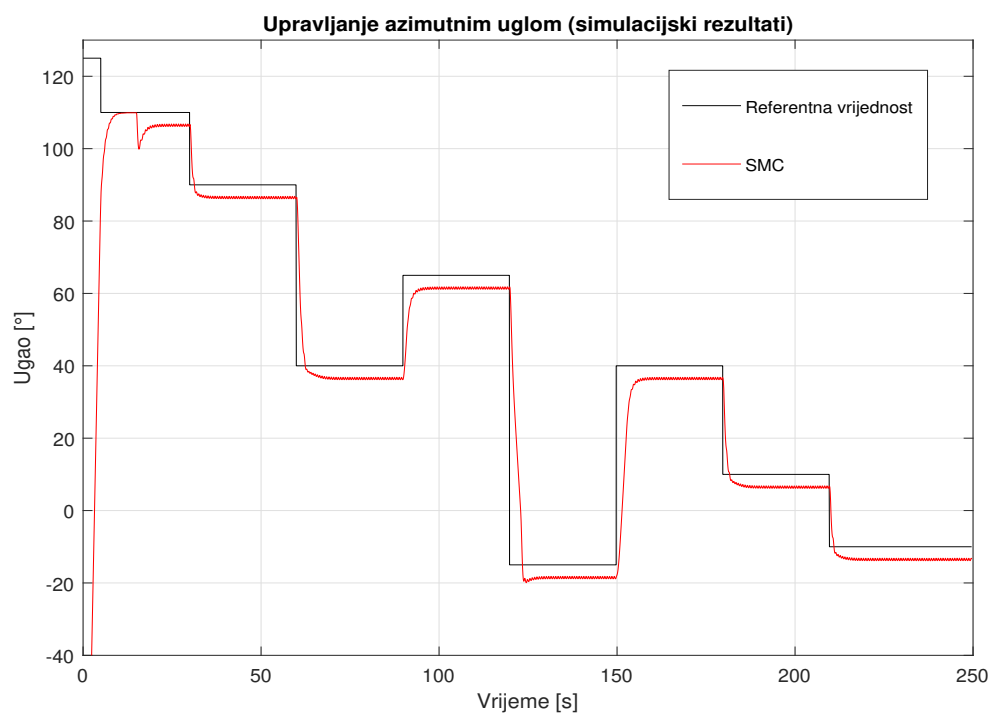
$$u = U \text{sat}(\delta, \varepsilon) = \frac{\delta}{|\delta| + \varepsilon} \quad (4.3)$$

$$u = U \tanh(\delta/\varepsilon) = \frac{e^{2\frac{\delta}{\varepsilon}} - 1}{e^{2\frac{\delta}{\varepsilon}} + 1} \quad (4.4)$$

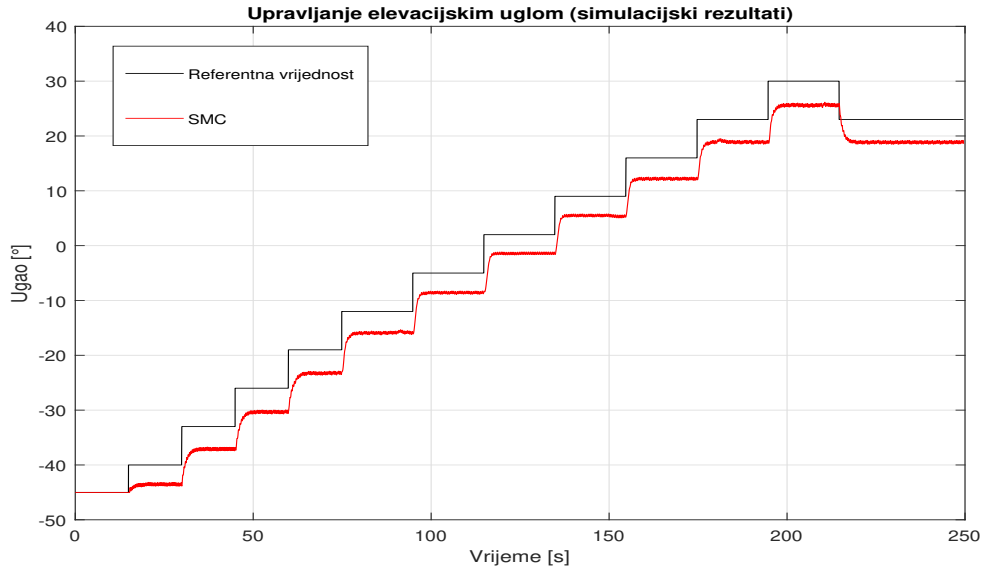
Ovaj metod je efikasan samo za specifične slučajeve, koji podrazumijeva odsustvo značajnih nesigurnosti upravljanja. Simulink shema oblikovana na temelju jednačine 4.4 se može vidjeti na slici 4.4, dok odzivi azimutnog i elevacijskog ugla se mogu naći na slikama 4.5 i 4.6, respektivno. Odzivi imaju smanjen chattering, no još uvijek nisu prihvatljivi kao rješenja.



Slika 4.4: Simulink shema SMC regulatora prvog reda sa aproksimiranom sgn funkcijom



Slika 4.5: Simulacijski rezultati upravljanja azimuta sa SMC regulatorom prvog reda sa aproksimiranom signum funkcijom



Slika 4.6: Simulacijski rezultati upravljanja elevacije sa SMC regulatorom prvog reda sa aproksimiranom signum funkcijom

4.4 "Super - Twisting" algoritam

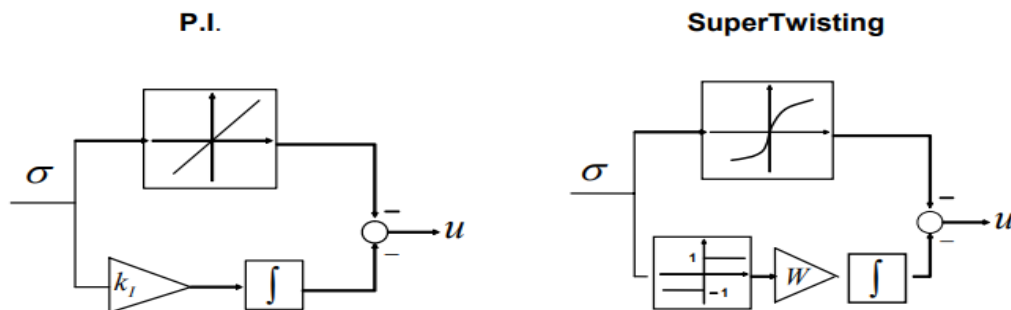
Ovaj algoritam predstavlja SMC regulator drugog reda. Metoda daje moćnu alternativu koja značajno smanjuje utjecaj chattering - a, bez narušavanja svojstva robusnosti sistema. Algoritam je predstavljen sa:

$$u = \lambda \sqrt{|\delta|} \operatorname{sgn}(\delta) + w \quad (4.5)$$

$$\dot{w} = W \operatorname{sgn}(\delta) \quad (4.6)$$

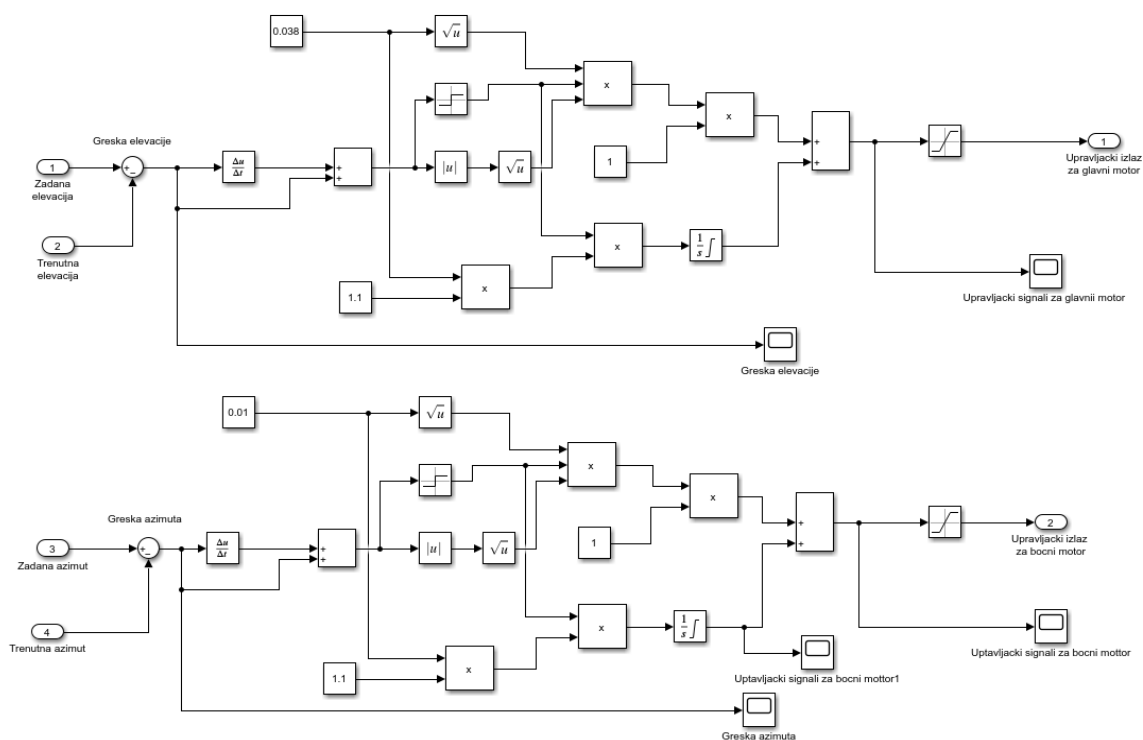
$$\lambda = \sqrt{U} \quad W = 1.1U \quad (4.7)$$

U je pozitivna konstanta koja se namješta empirijski, bilo kroz simulaciju ili kroz eksperiment. Konstanta se podešava sve dok se ne ostvare željene performanse metodom pokušaj - pogreška. Ovaj algoritam se može posmatrati kao nelinearna verzija PI kontrolera. Ovakvo upravljanje drastično smanjuje poteškoće koje uvodi chattering, zbog toga što je upravljački zakon sada kontinualna funkcija vremena klasičnog PI kontrolera (slika 4.7).

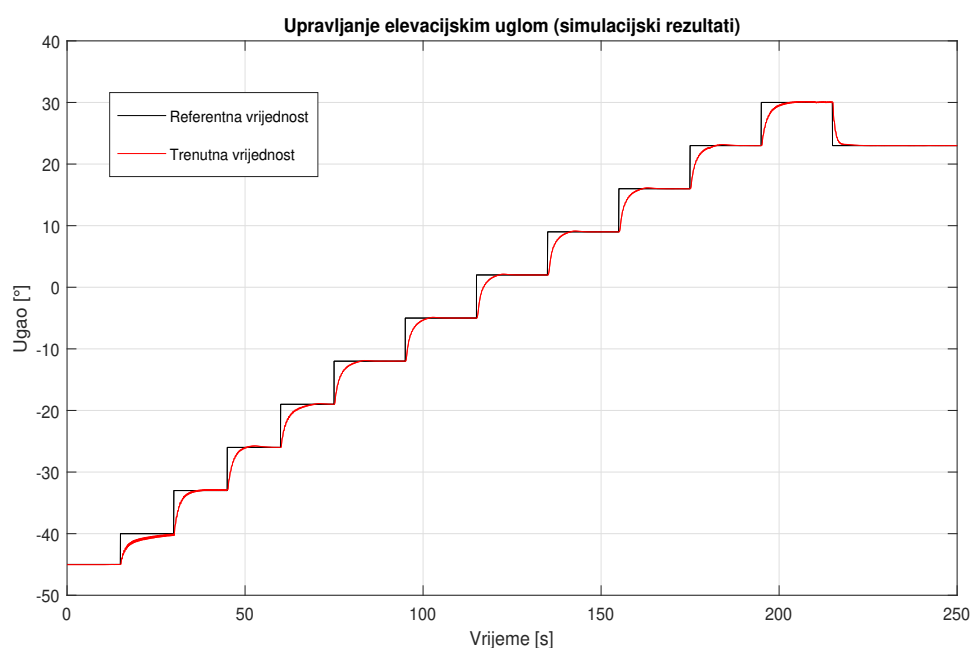


Slika 4.7: Blok shema PI (lijevo) i Super - Twisting (desno) regulatora

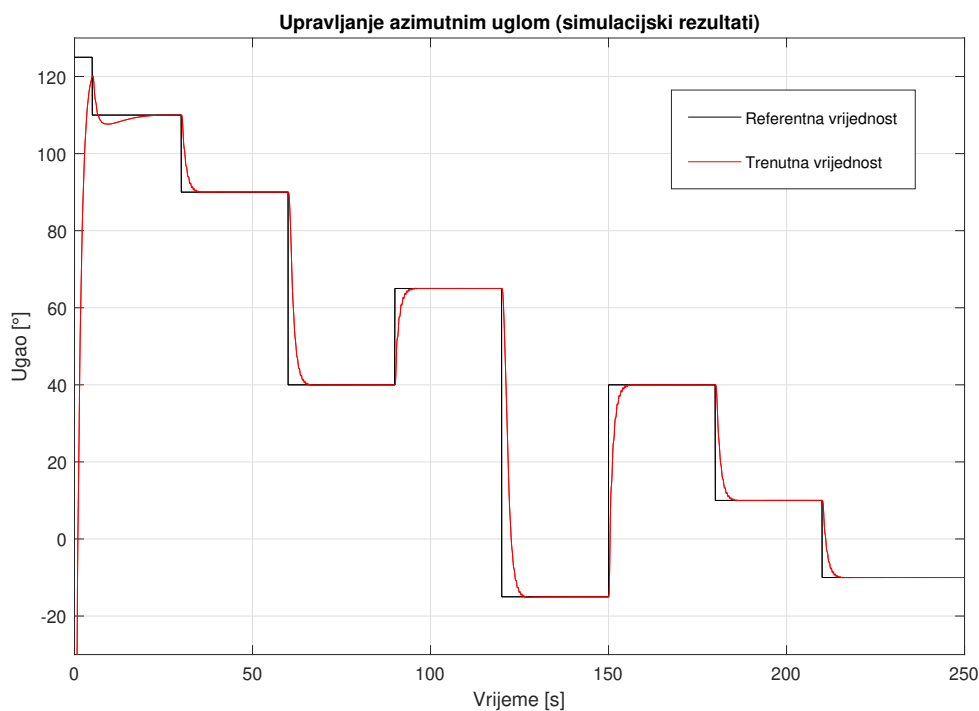
Simulink implementacija "Super - Twisting" algoritma je bez sumnje složenija od prethodno izloženih metoda (slika 4.8), no ipak lako razumljiva. Računarski simulirani odzivi uočljivi su na slikama 4.9 i 4.10. Problem chattering - a je drastično smanjen, dok je kvalitet odziva suštinski poboljšan. Zbog činjenice da je kvalitet upravljanja uvjerljivo najbolji u ovom slučaju, ovaj regulator će biti implementiran, a njegov rad verifikovan na stvarnom sistemu.



Slika 4.8: Simulink model za "Super - Twisting" SMC regulator



Slika 4.9: Simulacijski odziv za elevacioni ugao ("Super - Twisting " SMC regulator)



Slika 4.10: Simulacijski odziv za azimutni ugao ("Super - Twisting " SMC regulator)

* * *

Osnovni cilj ovog poglavlja bio je da istakne različite varijante sinteze SMC regulatora i njihovu implementaciju za konkretni problem upravljanja helikopterskim modelom. Pored toga navedene su razlike između spomenutih metoda, kao i njihovi nedostaci. Jednačine, zajedno sa slikama njihove implementacije u Simulink - u pružaju potpuni uvid u praktičnu realizaciju upravljačke komponente.

Poglavlje 5

Provjera validnosti sistema upravljanja

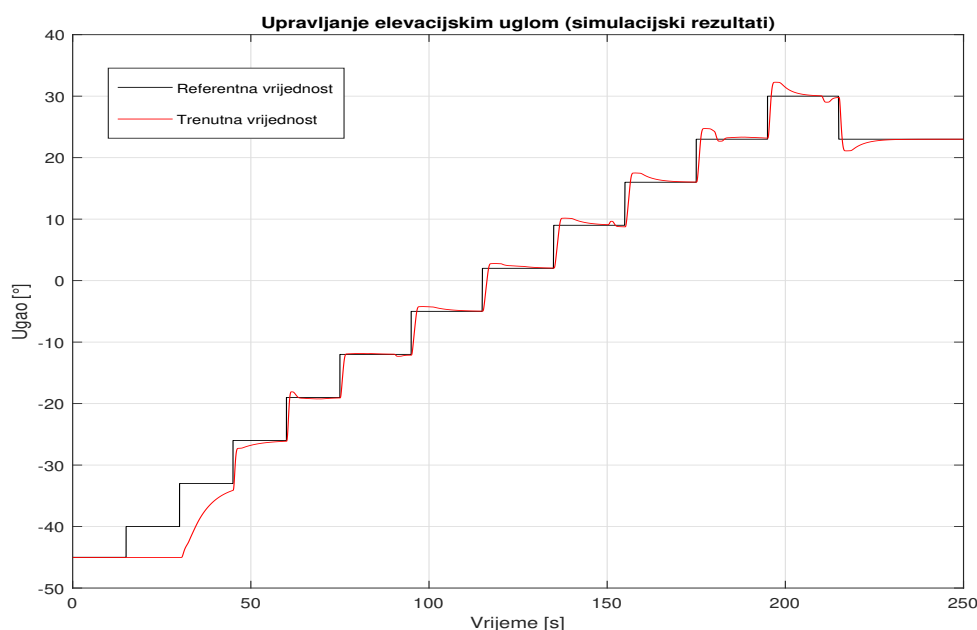
5.1 Simulacijski rezultati

5.1.1 Uvod

Preduslov za bilo kakve značajne rezultate kod eksperimentalnih odziva jeste dostatan simulacijski odziv. U nastavku teksta izložit će se simulacijski odzivi PID regulatora, adaptivnih regulatora, te napraviti poređenje između simulacijskih odziva "Super - Twisting" SMC regulatora, adaptivnog i PID regulatora.

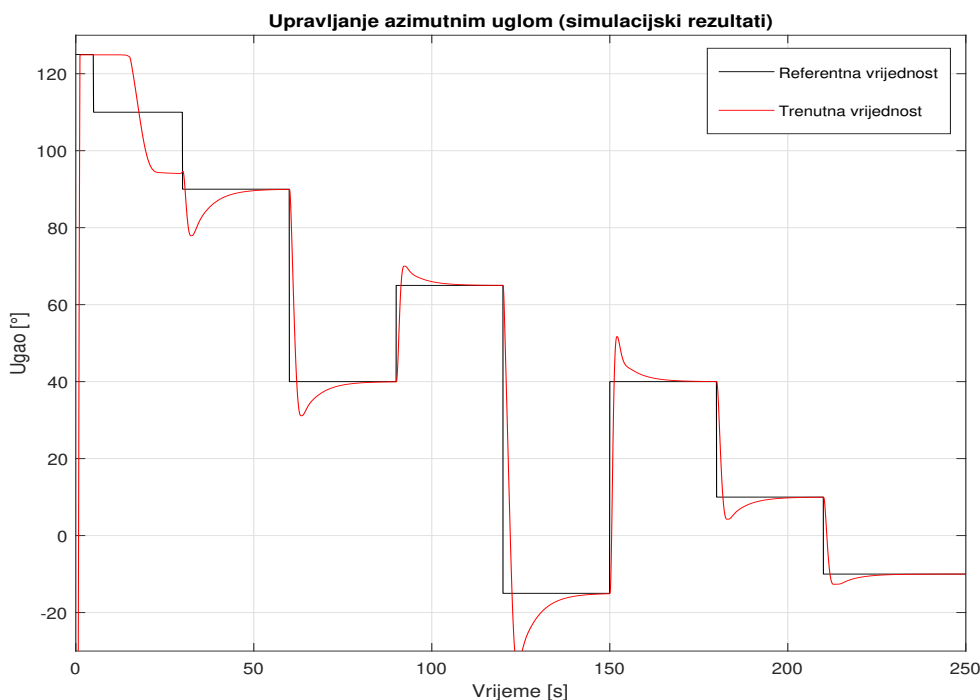
5.1.2 PID regulacija

Već ranije je spomenuto kako je PID regulator jedan od najčešće korištenih regulatora koji dosta često daje satisfaktorne ishode. Uz to, rečeno je da njegova primjena za nelinearne sistema daje skromne rezultate. Imajući ovo na umu, za očekivati je da PID neće obezbjediti dovoljno dobro ponašanje za izrazito nelinearnog sistema kakav je helikopter.



Slika 5.1: Simulacijski odziv za elevacioni ugao (PID)

Na slici 5.1 demonstriran je odziv PID regulatora za elevacioni ugao u ovisnosti od referentnog signala. Nazočni su preskoci, kao i podbačaji koji na helikopterskom modelu mogu izazvati značajne nestabilnosti uvjetovane inernosti sistema. Grafik 5.2 ne daje ništa bolje rezultate. Pored preskoka / podbačaja, evidentno je da je vrijeme smirivanja u određenim dijelovima dosta dugo (pogledati odziv za vrijeme 100 - 150 s).



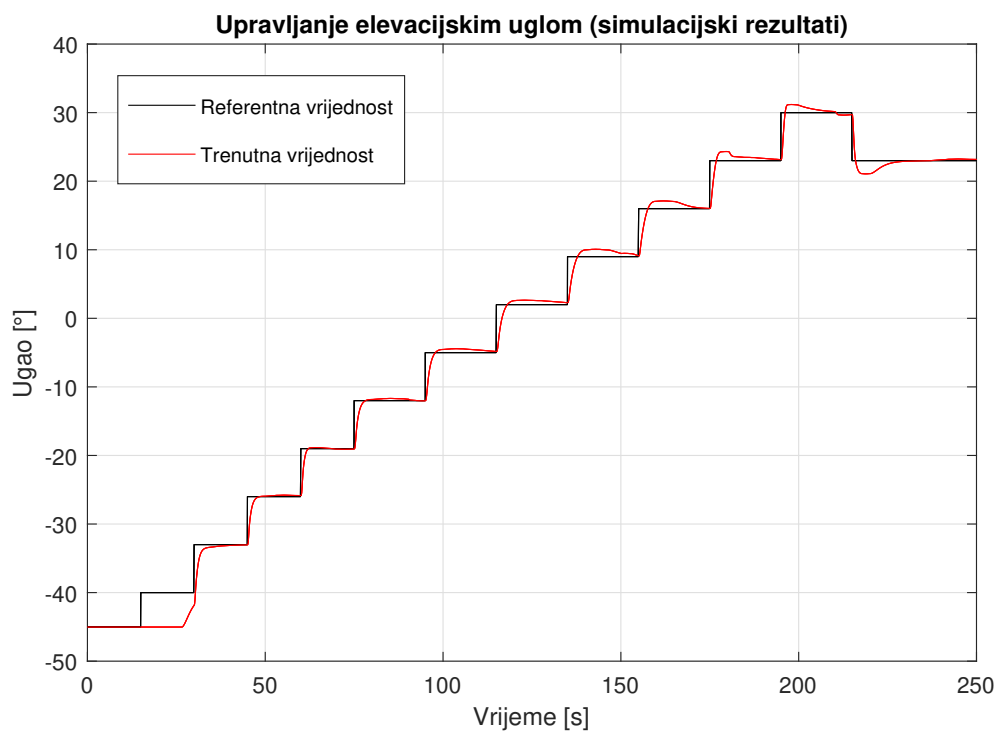
Slika 5.2: Simulacijski odziv za azimutni ugao (PID)

5.1.3 Adaptivni regulator

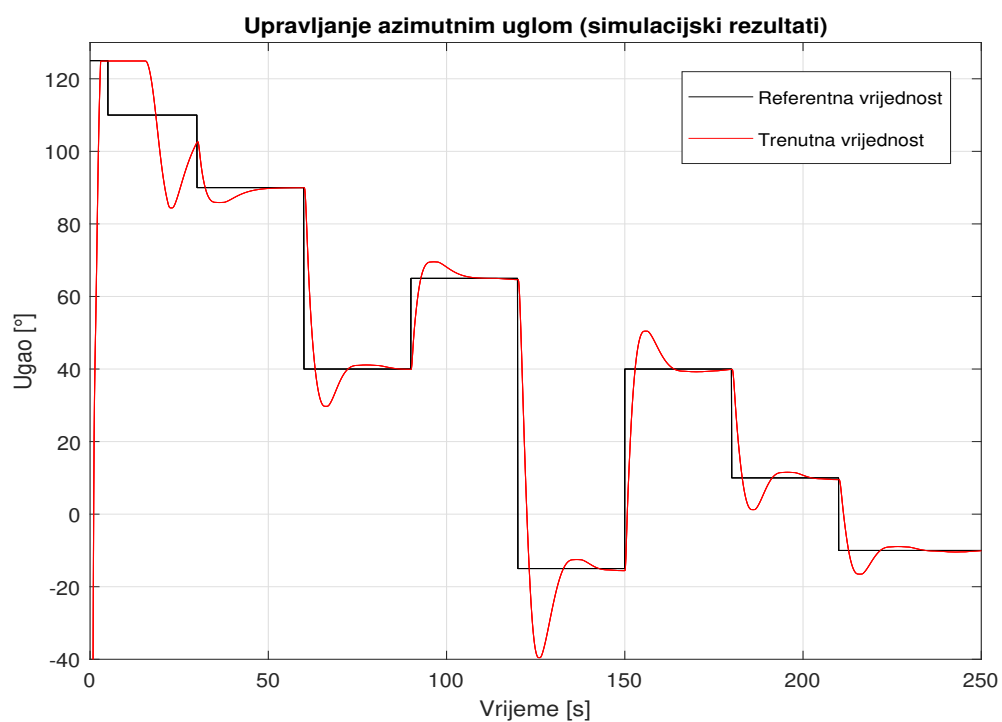
Dizajnirani adaptivni regulator u cjelosti je preuzet iz završnog rada kolegice Asije Boračić [10]. U nastavku će se u kratkim crtama pojasniti princip rada regulatora, a za detaljnije pojašnjenje sinteze adaptivnog regulatora baziranog na Gain - scheduling (promjenjivim pojačanjem) obratiti se ponuđenoj literaturi.

Adaptivno upravljanje predstavlja svrsishodno podešavanje parametara baznog regulatora u ovisnosti od trenutnih uvjeta rada. U konkretnom slučaju koristi se PID regulator kao bazni, a parametri koji se podešavaju su proporcionalna, integralna i derivaciona komponenta. Ovo upravljanje se koristi kada je model sistema upravljanja nepouzdan ili nedefinisan te podložan smetnjama. Sistem se dijeli u nekoliko radnih tačaka u kojima su predefinisani parametri PID regulatora. U slučaju prelaska iz jedne tačke u drugu, mijenjaju se parametri, te tako osiguravaju optimalne performanse.

Predloženi odzivi ne nude drastična poboljšanja performansi regulatora. Elevacioni je odlikovan bržim odzivom, te manjim preskocima koji ostaju potencijalni problem pri primjeni na stvarnom sistemu, ali o tome će biti govora u kasnijim poglavljima. Za odziv azimutnog ugla istrajavaju upečatljivi preskoci, što ne sluti obećavajućim rezultatima kod stvarnog sistema.



Slika 5.3: Simulacijski odziv za elevacioni ugao (Adaptivni regulator)

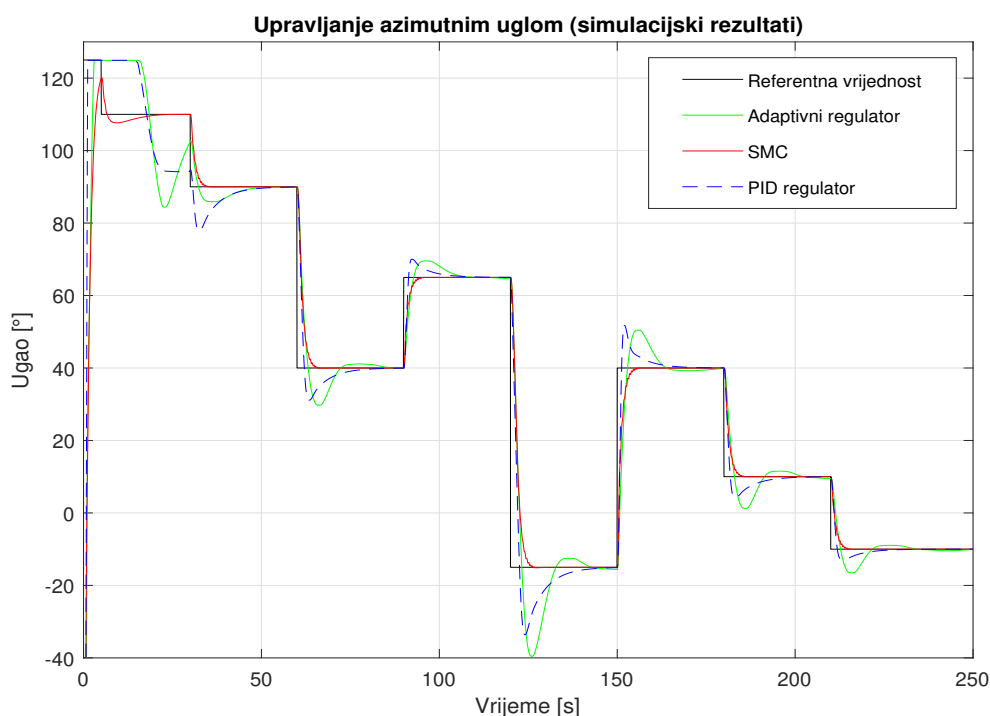


Slika 5.4: Simulacijski odziv za azimutni ugao (Adaptivni regulator)

5.1.4 Poređenje simulacijskih odziva

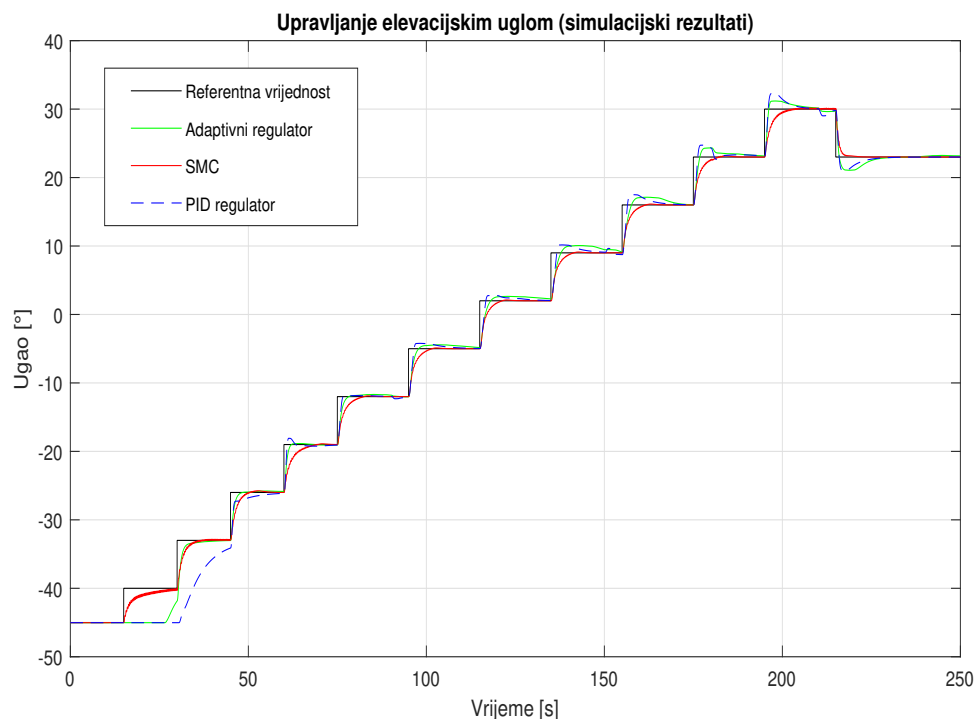
Nakon analize dobivenih simulacijskih rezultata, bit će moguće formirati odgovarajuća očekivanja od pojedinih regulatora, pa i pretpostaviti kvalitet odziva kod helikopterskog modela. Predstaviti će se odgovori sistema na zadani podražaj za sve upotrijebljene regulatore zajedno sa referentnom (zadanom) vrijednošću na jednom grafiku kako bi se lakše izvukli zaključci o kvaliteti upravljanja.

Pri analizi utjecaja regulatora za azimutni ugao teško je razlučiti da li je adaptivni regulator prevazišao nedostatke PID regulatora. Na nekim mjestima je odziv adaptivnog regulatora takav da ima manje preskoke, brže vrijeme smirenja, ali isto tako na drugima se javljaju značajni preskoci, čak i blage oscilacije. Ono što preostaje je da se vidi kako će se ova dva regulatora pokazati na pravom sistemu. Sada će se pogledati odziv za "Super - Twisting" SMC regulator, čemu se pridaje značaj u ovom radu. Na samom početku vidljiv je dosta mali podbačaj, koji ni u kom slučaju nije gori od oscilacija kakve se zapažaju kod adaptivne i PID regulacije. Nakon toga sistem dosta brzo, bez ikakvih prebačaja / podbačaja prati zadane vrijednosti, u čemu se ogledaju njegove prednosti u poređenju sa ostala dva regulatora.



Slika 5.5: Poređenje simulacionog odziva svih regulatora za azimutni ugao

Odziv adaptivnog regulatora za elevacioni ugao je ubjedljivo bolji od odziva PID regulatora, ali izgleda nedostatan kada se poredi sa SMC - om. SMC je u stanju da veoma brzo prati odzive, bez ikakvih oscilatornih ponašanja. Ako je suditi po simulaciji, SMC je očigledni pobjednički izbor.



Slika 5.6: Poređenje simulacionog odziva svih regulatora za elevacijski ugao

* * *

U ovom poglavlju izloženi su simulacioni rezultati za svaki od regulatora pojedinačno, analizirano je njihovo ponašanje i prokomentarisana je kvaliteta svakog pojedinačnog odziva. Ovo je urađeno kako za regulator koji se odnosi na azimutni ugao, tako i za regulatori određen za elevacioni. Na kraju analize izvršeno je i poređenje sva tri regulatora. Observacija je nedvosmisleno dokazala da je "Super - Twisting" algoritam daleko najbolji izbor za upravljanje helikopterskim sistemom. Treba imati na umu da model koji je korišten je dosta dobar, ali ne i savršen. Ovo može imati za posljedicu drugačije ishode ponašanja za vrijeme sprovođenja pokusa. Temeljitije o ovome će govoriti naredno poglavlje.

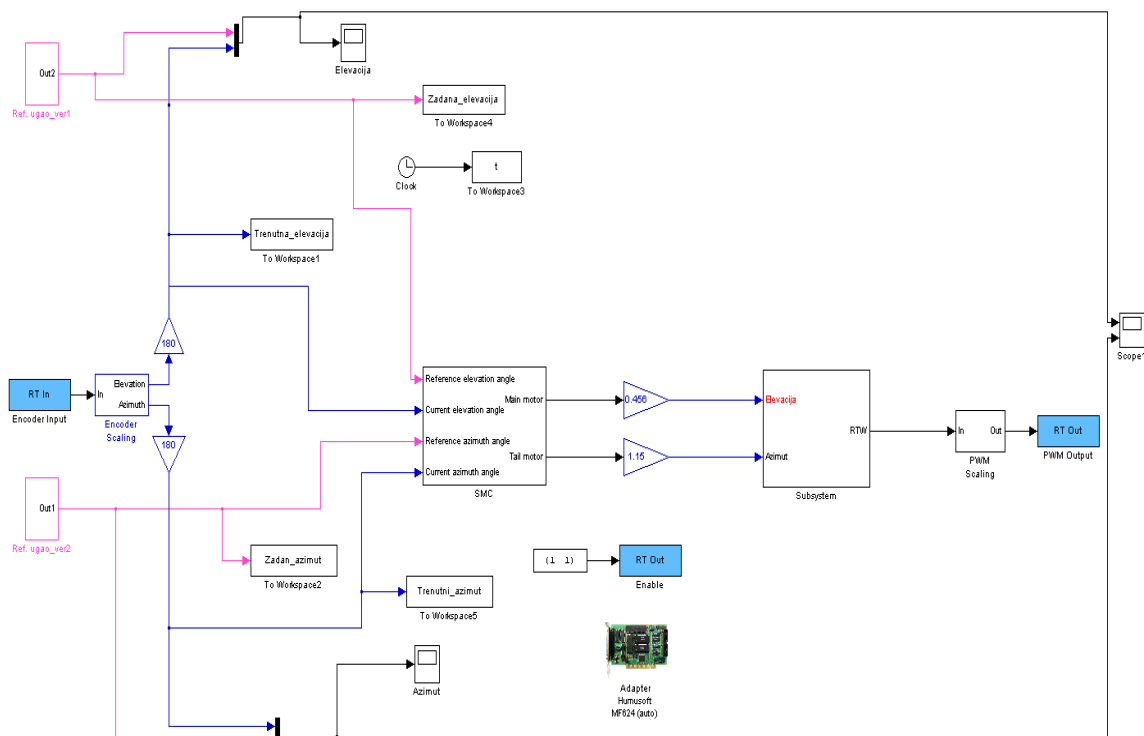
5.2 Eksperimentalni rezultati

5.2.1 Uvod

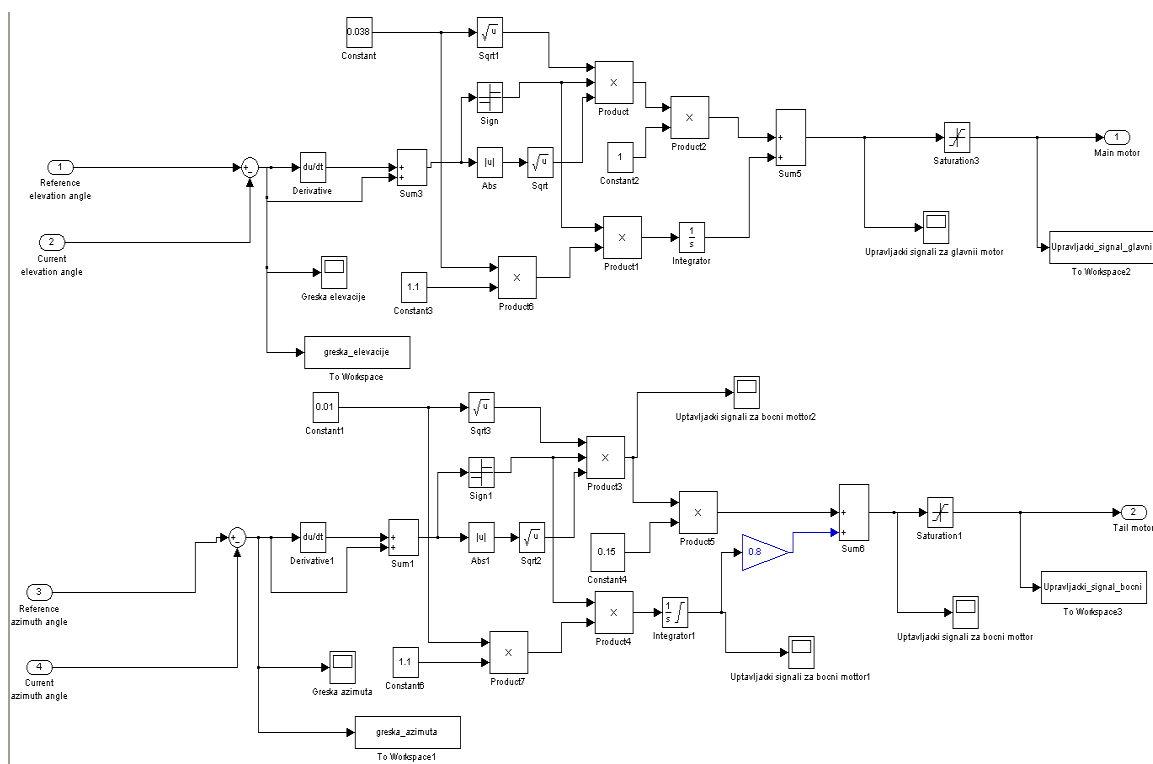
Prije nego što se izlože eksperimentalni rezultati, pojasnit će se uslovi sprovođenja eksperimenta, kao i alati koji će biti korišteni. Na slici 5.7 prikazana je Simulink shema upotrijebljena za upravljanje helikopterskim sistemom. Koriste se dva ulaza za zadavanje trenutnih uglova azimuta i elevacije (u stepenima). Prilagođeni upravljački signali se šalju stvarnom sistemu. Povratne informacije govore trenutni ugao elevacije / azimuta, a ovime se koriste regulatori kako bi generisali upravljački signal. Sve ovo je sa ciljem smanjenja trenutne greške i ostvarivanja kvalitetnog upravljanja.

SMC regulator koji je implementiran zahtijevao je minorne modifikacije kako bi se ostvarilo

kvalitetno upravljanje. Ovo je podrazumijevalo smanjivanja utjecaja derivacione komponente, što je urađeno uvođenjem bloka množača (vrijednosti 0.15). Ovo je pokazano na slici 5.8



Slika 5.7: Simulink shema upravljanja helikoptera

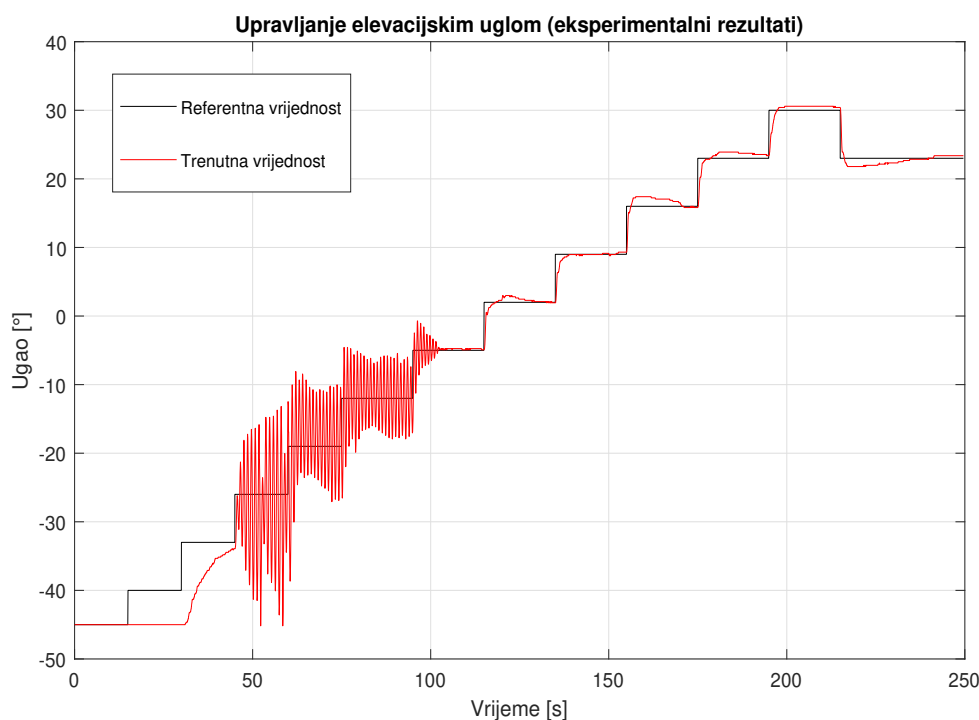


Slika 5.8: Simulink shema SMC regulatora realizovanog na stvarnom sistemu

5.2.2 PID regulator

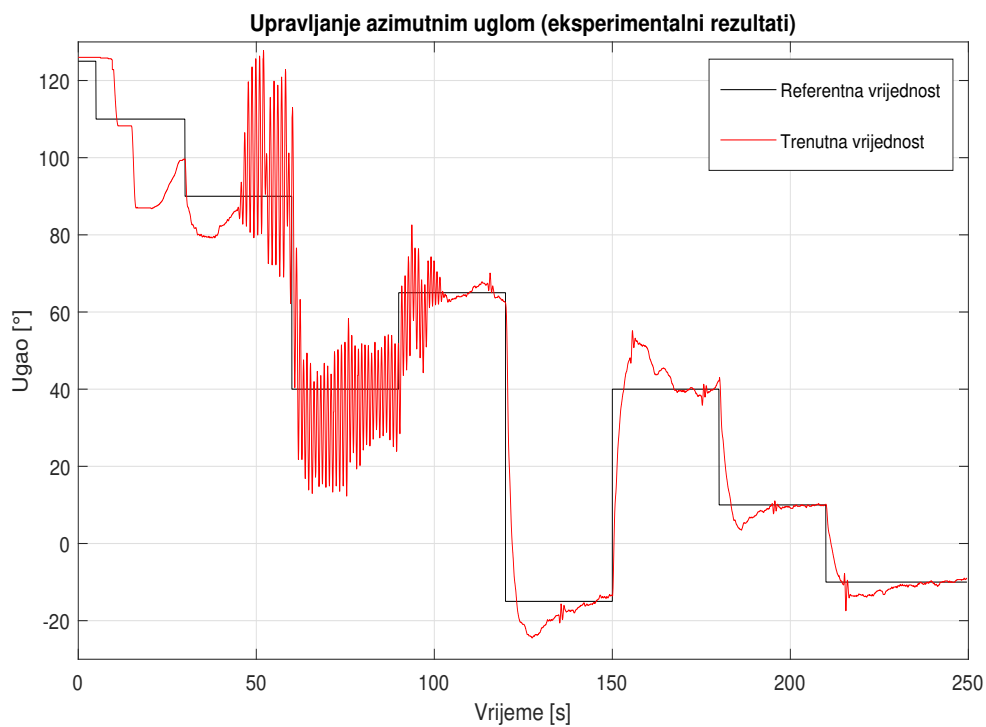
Premisa za PID regulator je bila da će dati neprikladne rezultate, budući da je to bio slučaj već u simulacionom okruženju. Upravljanje stvarnog sistema dodatno je otežano postojanjem međusprežnih efekata između glavnog i bočnog propelera. Ovo znači da rad jednog se registruje kao smetnja pri radu drugog. Ove dodatne, otežavajuće okolnosti su dovele do pojave izrazite oscilatornosti kod stvarnog sistema.

Upravljanje elevacionog ugla se vidi na slici 5.9. Praćenje na samom početku se može smatrati prihvatljivim, u najmanju ruku stabilnim. Ubrzo nakon trećeg Step signala sistem počinje da osciluje i ovo ponašanje traje sve do 100 - te sekunde, kada se uspjeva stabilizirati. Ostatak eksperimenta regulator prati upravljački signal poprilično pristojno, uz male preskoke / podbačaje.

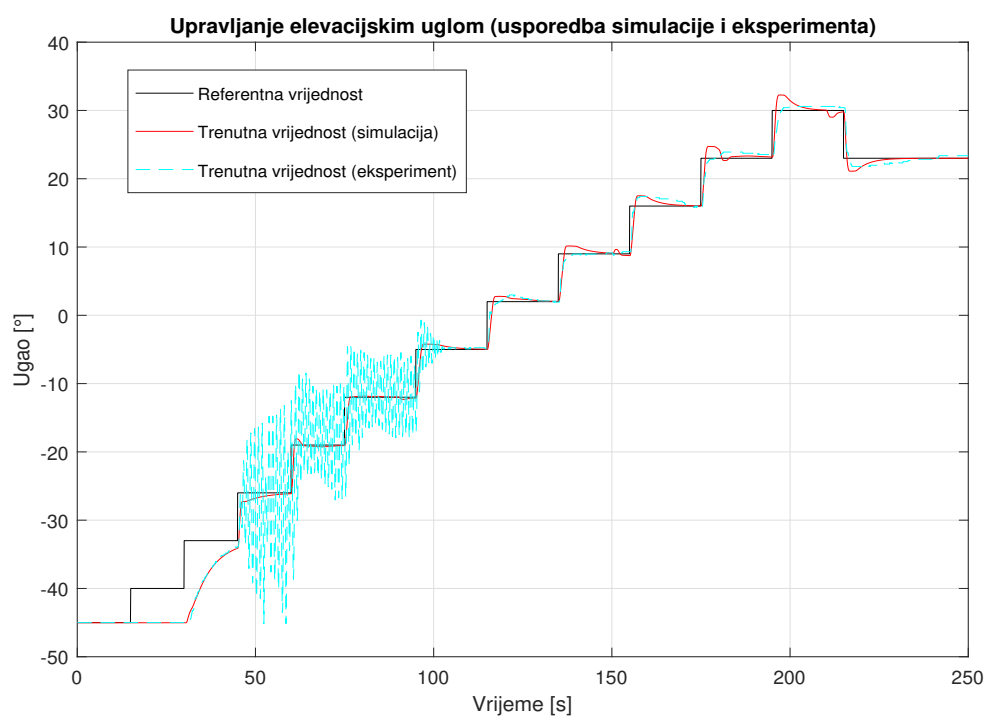


Slika 5.9: Eksperimentalni odziv za elevacioni ugao (PID regulacija)

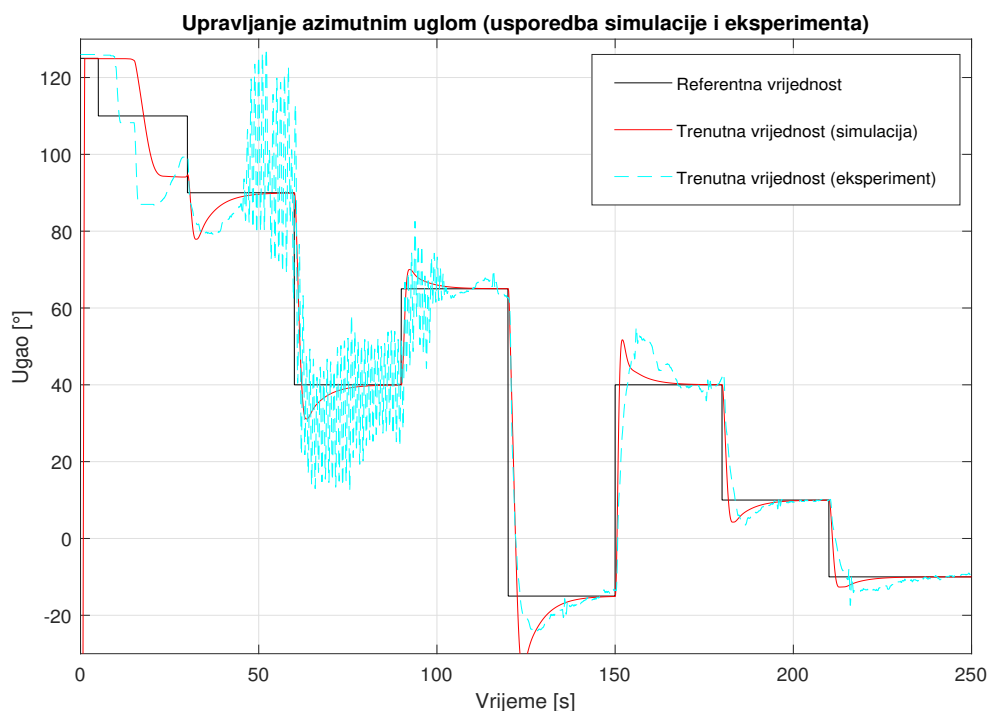
Problemi koji prate upravljanje elevacijskog ugla, prate i upravljanje azimutnog ugla (slika 5.10). Čim počnu oscilacije elevacijskog ugla započinju i oscilacije azimutnog ugla, ali i završavaju otprilike u isto vrijeme. Nakon toga praćenje referentne veličine je nesatisfakorno, odlikovano ne samo velikom greškom, već i pozamašnim preskocima, odnosno podbačajima. Komparacijom simulacijskog odziva i eksperimentalnog, trivijalno je zaključiti da postoji ogromna nesuglasica oko dijela kada sistem zaoscilira. Dodatnom evaluacijom se ustanovljava da postoji značajno poklapanje simulacije i eksperimenta u svim ostalim djelovima odziva. Do ovih zapažanja došlo se proučavanjem slika 5.11 i 5.12. Sam PID regulator nije opremljen sa potrebnim alatima da kompenzira različite smetnje koje se mogu javiti kod njegovog rada u nelinearnom, inherentno nestabilnom okruženju.



Slika 5.10: Eksperimentalni odziv za azimutni ugao (PID regulacija)



Slika 5.11: Poređenje eksperimentalnog i simulacionog odziva za upravljanje elevacije (PID)



Slika 5.12: Poređenje eksperimentalnog i simulacionog odziva za upravljanje azimuta (PID)

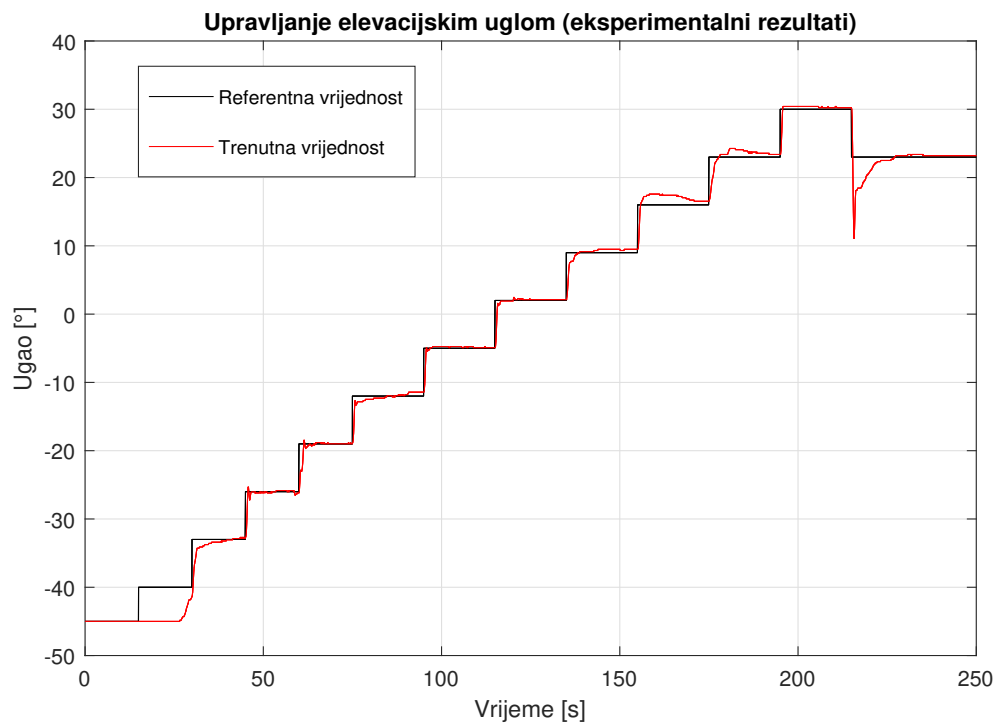
5.2.3 Adaptivno upravljanje

Kod evaluacije simulacionih odziva rečeno je da oni ne odudaraju previše mnogo od odziva PID regulatora. Unatoč tome, generisani pokusni odzivi su radikalno bolji od onih ostvarenih PID regulacijom. Razlozi su relativno jednostavni. Adaptivno upravljanje je upravljanje namijenjeno za nestabilne sisteme, podložne smetnjama. Ovo savršeno opisuje posmatrani helikopterski model. Stoga ova metoda je u stanju da prevaziđe smetnje koje se javljaju usred međusprežnih efekata i ostvari srazmjerno dobre rezultate.

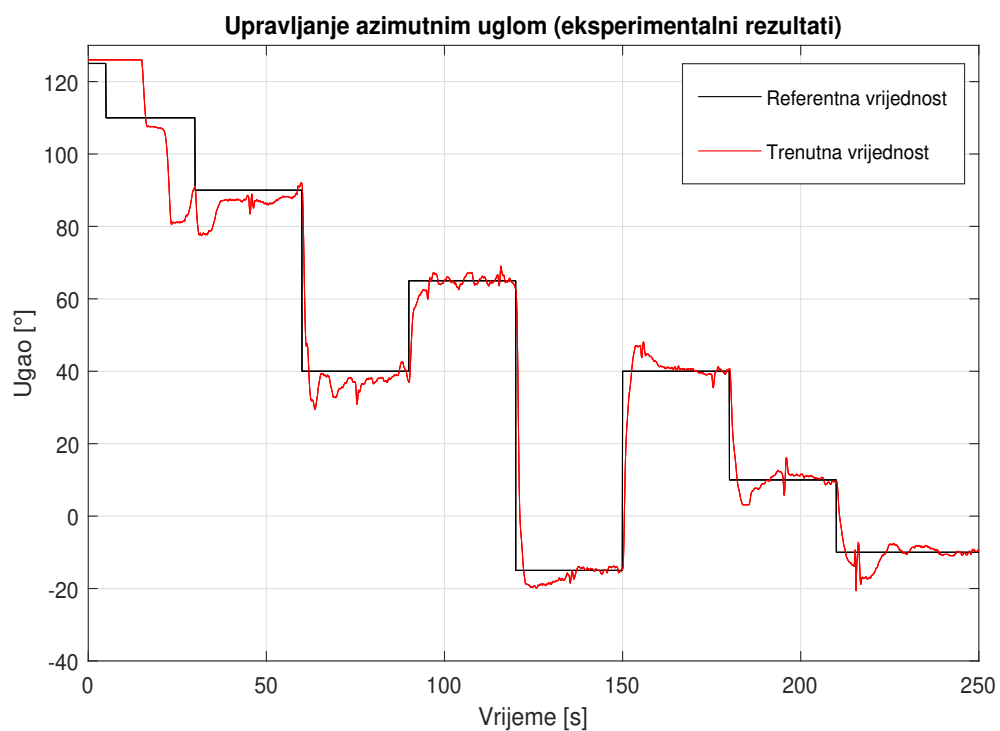
Odziv sistema za elevacioni ugao sasvim prikladno prati promjene referentne veličine, uz minorne preskoke. Na samom početku kasni sa praćenjem prvog stepa, toliko da nije u stanju uopšte da dosegne zadanu vrijednost na vrijeme, ali nakon toga ne nailazi se na sličan problem. Dalo bi se još prokomentarisati značajan pad pri samom kraju odziva koji PID regulator nije dao, koji bi potencijalno bio bolji dodatnim podešavanjem parametara.

Odziv sistema za azimutni ugao kontekstualno dobro prati promjene zadane vrijednosti. Velika mana je prisutnost oscilacija. Njihov intenzitet je izraženiji nakon nagle promjene referentne veličine. Unatoč tome, sistem sa adaptivnim upravljanjem daje zasigurno zadovoljavajuće odzive. Spomenuti nedostaci bi se gotovo sigurno mogli otkloniti dodatnim podešavanjem parametara, ili barem vidno smanjiti.

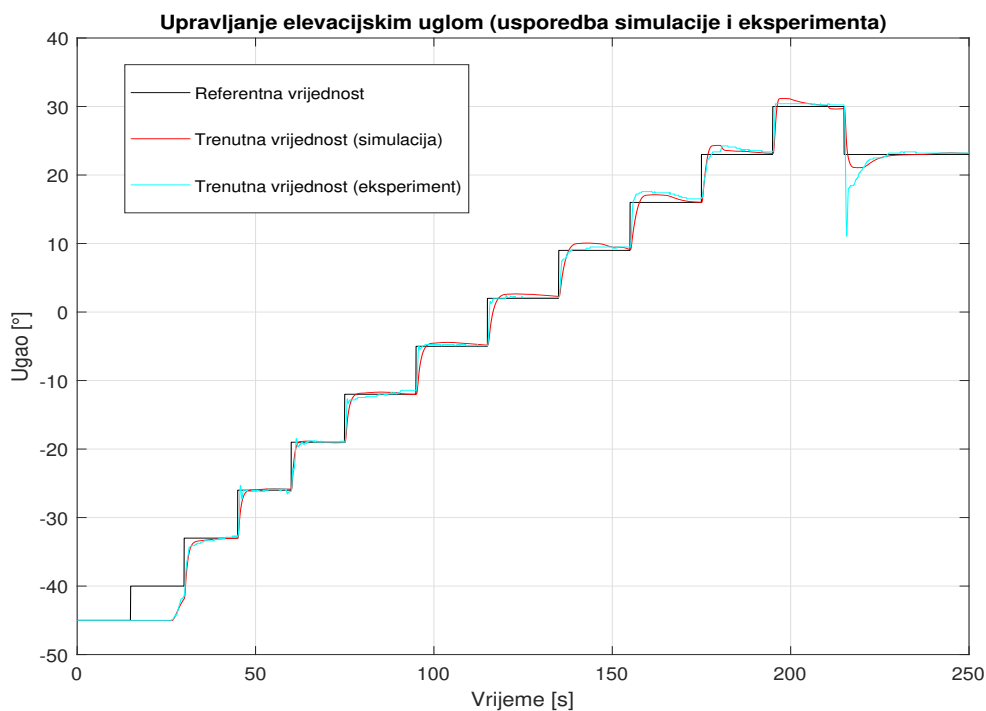
Naredne stranice sadrže grafike koji porede poklapanje simulacije i eksperimenta. Pokazuje se da simulacija poprilično dobro predviđa stvarno ponašanje sistema. Za upravljanje elevacionog ugla eksperiment je dao za veći dio vremena bolji ili jednak odziv, izuzev trenutka kada se desio veći podbačaj od anticipiranog. Praćenje zadanog azimutnog ugla je saglasno sa simulacijom, naravno uz određena odstupanja uzrokovana stvarnim smetnjama i nedefinisanosti modela helikoptera.



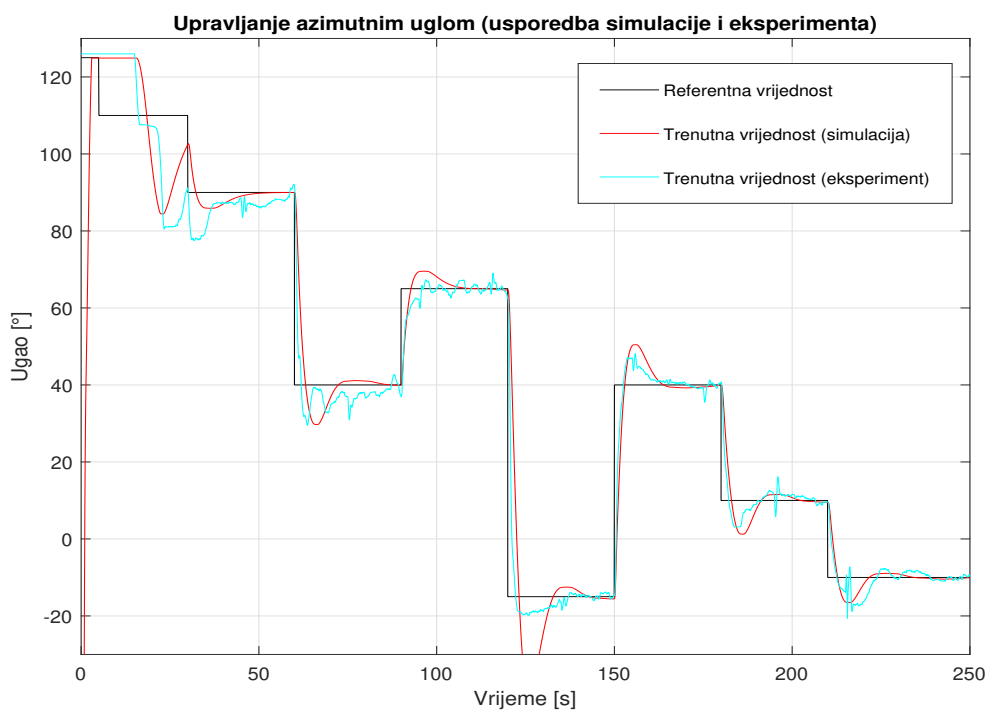
Slika 5.13: Eksperimentalni odziv za elevacioni ugao (Adaptivno upravljanje)



Slika 5.14: Eksperimentalni odziv za azimutni ugao (Adaptivno upravljanje)



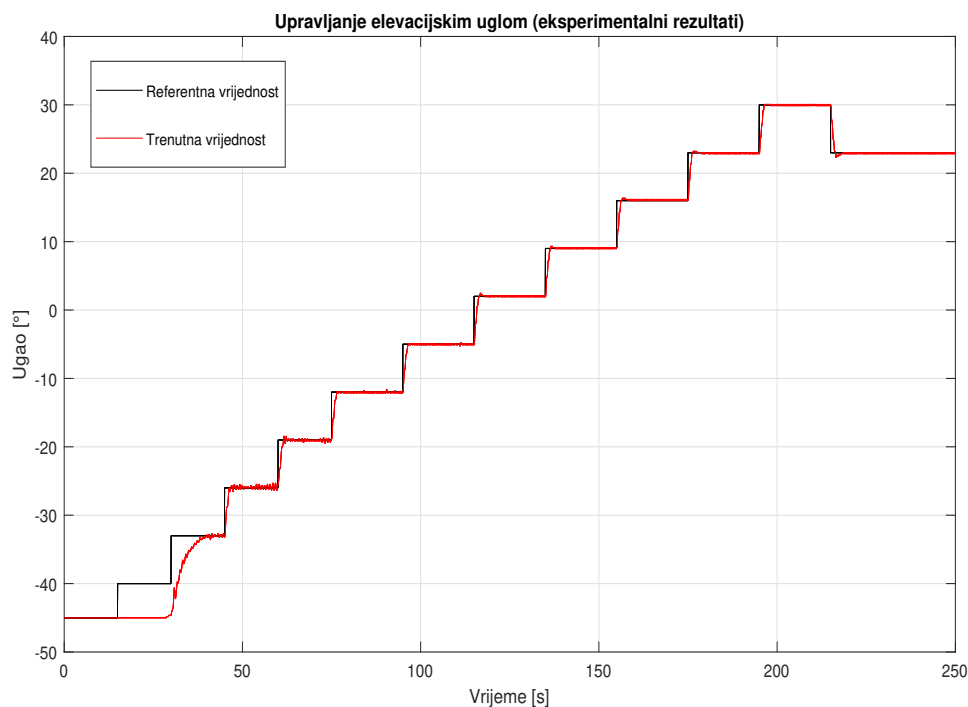
Slika 5.15: Poređenje eksperimentalnog i simulacionog odziva za upravljanje elevacije (Adaptivni regulator)



Slika 5.16: Poređenje eksperimentalnog i simulacionog odziva za upravljanje azimuta (Adaptivni regulator)

5.2.4 SMC regulator

Praćenje kretanja elevacionog ugla (slika 5.17) u odnosu na referentnu vrijednost kod SMC regulatora je izrazito brzo i sa minimalnim preskocima / podbačajima. Jedino kašnjenje koje se javlja jeste na samom početku, elevacioni ugao ne uspijeva da dosegne vrijednost prve step funkcije. Sve u u svemu, ovaj eksperimentalni odziv je odličan.

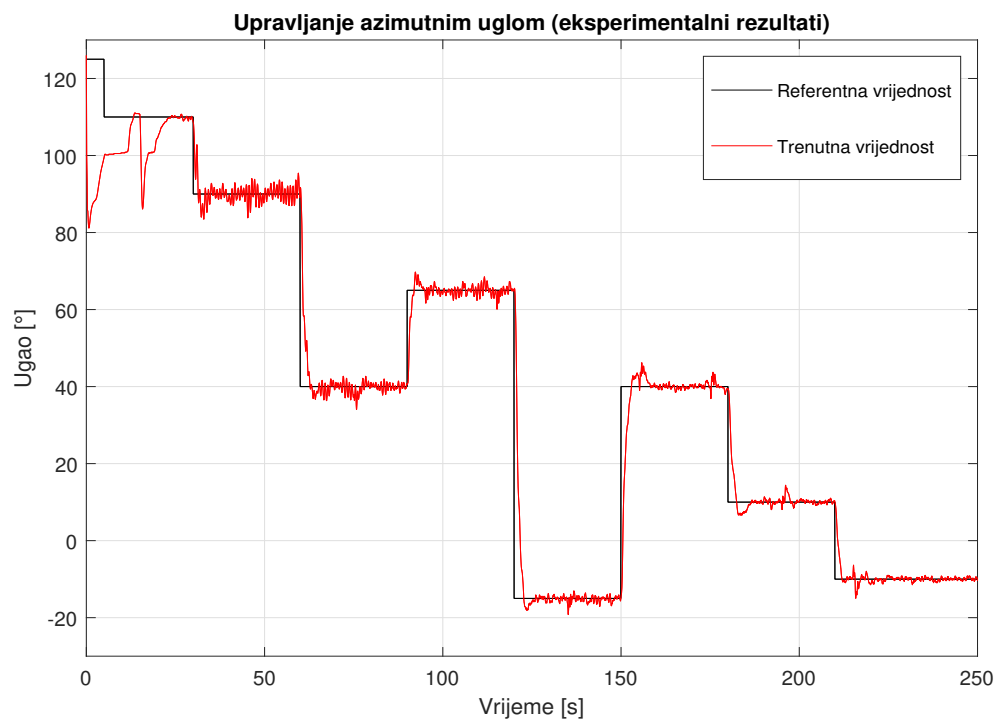


Slika 5.17: Eksperimentalni odziv za elevacioni ugao (SMC)

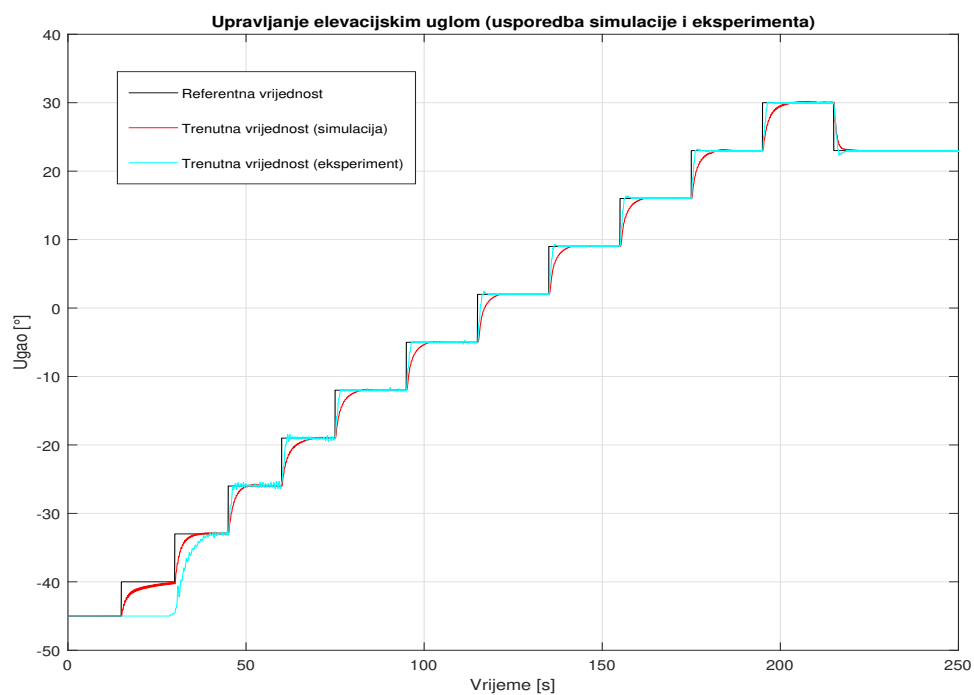
Problem sa odzivom azimutnog ugla (slika 5.18) jeste taj što su prisutne pozamašne oscilacije, pogotovo na samom početku. Uprkos tome one nisu pretjerano problematične kako njihova amplituda nije isuviše velika. Nadalje ta se amplituda dodatno smanjuje vremenom, što sugestira da je ovo jedan od problema koji je dominantniji pri početnom pokretanju sistema i nešto je protiv čega se regulator može boriti.

Razmotrit će se sličnosti, odnosno razlike između simulacionog odziva i njemu pripadajućeg eksperimentalnog odziva. Kod upravljanja elevacionog ugla (slika 5.19) pokusni odziv je dosta brži od simulacionog (ako se izuzme prvih 40 sekundi) i sa približno istom greškom praćenja. Ovime se može tvrditi da je model korišten u simulaciji savršeno adekvatan za sintezu kvalitetnog robusnog regulatora, te se potvrđuje ispravnost identifikacije parametara sistema helikopterskog modela.

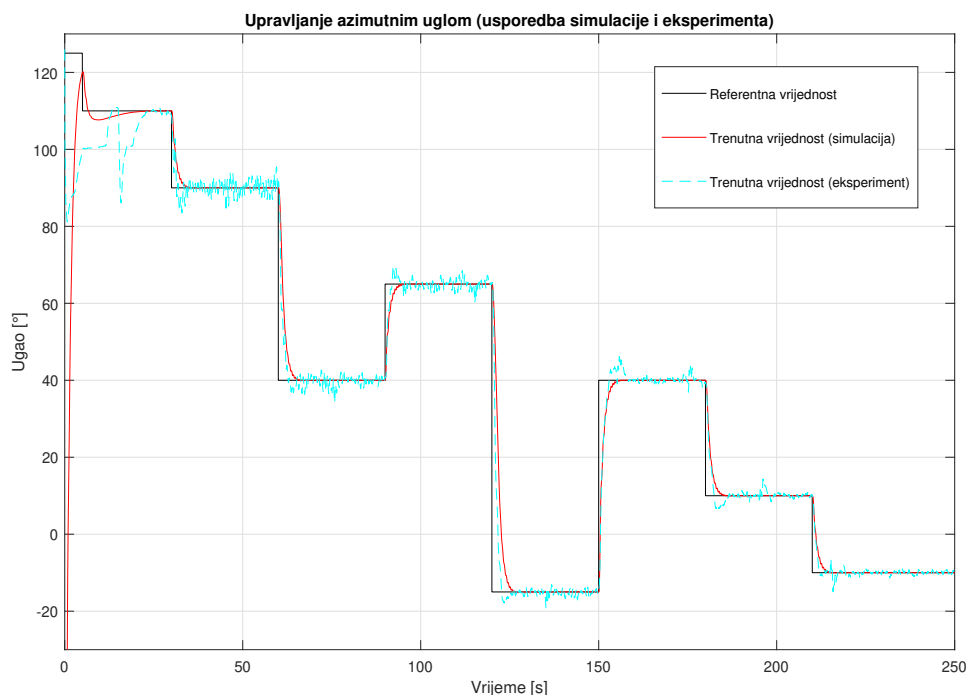
Eksperimentalni odziv azimutnog ugla, s druge strane pruža uvid u probleme međusprežnih efekata i nestabilnosti sistema. Zanimljivo je uočiti kako se značajniji preskoci za azimutni ugao dešavaju tada kada se referentna vrijednost elevacionog ugla promijeni, što potkrepljuje tvrdnju ovisnosti rada glavnog i bočnog motora. Evidentne su značajne oscilacije, sa ponekim preskokom. Ovi ponašajni obrasci se nisu manifestovali na simulacionom odzivu (slika 5.20). Premda ovo nije pohvalno, potrebno je uvažiti činjenicu da oscilatornost u stacionarnom stanju se smanjuje prolaskom vremena.



Slika 5.18: Eksperimentalni odziv za azimutni ugao (SMC)



Slika 5.19: Poređenje eksperimentalnog i simulacionog odziva za upravljanje elevacije (SMC)



Slika 5.20: Poređenje eksperimentalnog i simulacionog odziva za upravljanje azimuta (SMC)

* * *

Na narednoj stranici dati su grafici sa odzivima svih regulatora korištenih u eksperimentu. Odatle je prostije zaljučiti prednosti korištenja jedne vrste regulatora u odnosu na drugu. Radi dosljednosti odzivi respektivnih regulatora su na oba grafika obojena istom bojom. Zbog toga što je svaki eksperimentalni odziv već prokomentarisani u stranicama koje prethode ovaj paragraf, ovdje će se dati samo kratka rekapitulacija saznanja koje je pružio eksperiment.

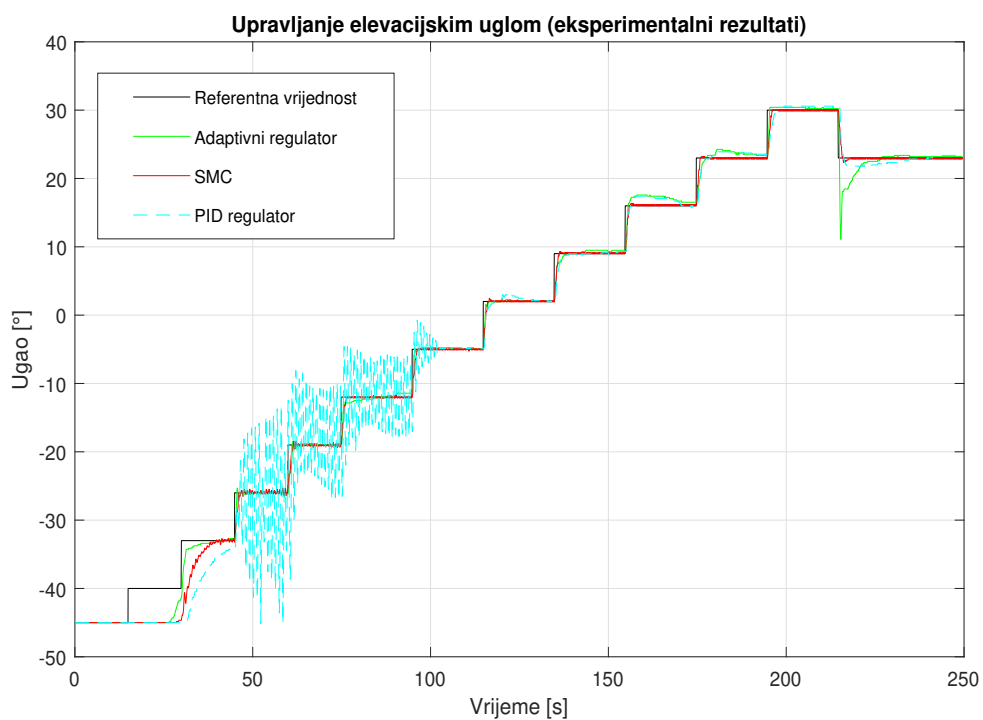
PID regulator nije bio u stanju da pruži zadovoljavajuće performanse, konkretno zbog postojanja ogromnih oscilacija.

Prihvatljiva alternativa PID regulatoru pokazao se adaptivni regulator baziran na gain - scheduling - u. Ovakav regulator dosljedno prati zadane vrijednosti, uz vidljivo manje oscilacije. Dodatna podešavanja ovog regulatora nude obećavajuće rješenje problema kontrole helikopterskog modela.

Ubjedljivo najbolja alternativna regulisanja konkretnog procesa pokazala se da je upravljanje sa kliznim režimom upotrebom "Super - Twisting" algoritma. Odlikovano je brzim praćenjem zadane vrijednosti elevacionog ugla, te minorne oscilacije pri praćenju azimutnog ugla. Za ove oscilacije bitno je naglasiti i to da se one amplitudno smanjuju vremenom.



Slika 5.21: Poređenje eksperimentalnog odziva svih regulatora za azimutni ugao



Slika 5.22: Poređenje eksperimentalnog odziva svih regulatora za elevacijski ugao

Zaključak

Zadatak koji je postavljen za ovaj završni rad jeste sinteza robusnog regulatora za potrebe upravljanja laboratorijskog modela helikoptera CE150. Ovo je postignuto korištenjem metode kliznih režima, tačnije "Super - Twisting" algoritma. Ono što je prethodilo sintezi regulatora bio je kratki uvod u fizikalnost samog sistema upravljanja, ali i pojašnjavanje matematskog modela koji je kasnije upotrijebljen za simuliranje rada regulatora. Pri kreaciji SMC regulatora testirane su tri metode upravljanja, nakon čega se odlučilo za "Super - Twisting" SMC. Kao referentna grupa korišteni su PID regulator i adaptivni regulator. PID regulator, kao i princip rada istog su detaljno obrađeni, dok je model adaptivnog regulatora preuzet [10]. Nakon tempiranja parametara sva tri regulatora u simulacionom okruženju, pristupilo se eksperimentalnoj verifikaciji rada. Ovo je potvrdilo ispravnost izbora SMC regulatora kao upravljačkog sistema, te se pokazalo da je u stanju prevazići ograničenja upotrijebljenog adaptivnog i PID regulatora. Dobiveni odzivi su se međusobno poredili i o svakom se iznio zaključak o efikasnosti regulacije. Rezultati rada robusnog regulatora su zadovoljavajući, ali postoji prostor za napredak. Naredni korak ka još kvalitetnijem upravljanju bi bio korištenje adaptivne tehnike nad postojećim robusnim regulatorom. Ovako dobijeni sistem bi bio otporniji na utjecaje smetnje i zasigurno bi uveliko poboljšao karakteristike odziva. Zaključno, uspješno je realizovan robusni regulator sa zadovoljavajućim performansama pri radu fizičkog sistema.

Literatura

- [1] Shtessel, Y., Edwards, C., Fridman, L., Levant, A., Sliding Mode Control and Observation, 2014.
- [2] Decarlo, R. A., Žak, S. H., “A quick introduction to sliding mode control and its applications 1”, 2008.
- [3] CE150 Helicopter Model, TecQuipment, posljednji pristup 12.7.2023., dostupno na: <https://www.tecquipment.com/assets/documents/datasheets/CE150-Helicopter-Model-0417.pdf>
- [4] Dr. Petr Horáček, Helicopter Educational Manual, Department of Control Engineering, Faculty of Electrical Engineering, Czech Technical University of Prague, Prague, Czech, posljednji pristup 12.7.2023., dostupno na: http://control.dii.unisi.it/cmr/altro/heli_ce150_manual.pdf
- [5] Nedim Osmić, Sinteza fuzzy viševarijabilnog sistema upravljanja i stabilizacije laboratorijskog modela helikoptera, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Sarajevu, 2009.
- [6] Ahić-Đokić, M., “Signali i sistemi”, Elektrotehnički fakultet u Sarajevu, 2010, str. 5-6.
- [7] Jasmin Velagić, Predavanja na predmetu Mehatronika, ETF Sarajevo, Ak. 2022/2023. god.
- [8] Boračić Asija, Džananović Naila, Vladavić Salko, PID regulacija brzine vrtnje DC motora, ETF Sarajevo, Ak. 2021/2022. god.
- [9] Khaled, H., Boukhetala, D., Boudjema, F., Introduction to Robust Control Techniques, 2011.
- [10] Asija Boračić, Adaptivno upravljanje laboratorijskim modelom helikoptera, ETF Sarajevo, Ak. 2022/2023. god.